

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18796 BR

Thema

Hybrid-Reibbeschichten zur Applikation des Lotes

Berichtszeitraum

01.01.2017 - 31.08.2019

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS

Forschungseinrichtung

Technische Universität Dresden

Institut für Fertigungstechnik

Professur für Fügetechnik und Montage

01062 Dresden

Projektbearbeitung

Dipl.-Ing. David Köberlin

Dresden, 11.02.2020

Ort, Datum


Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Zusammenfassung

Das Forschungsthema „Hybrid-Reibbeschichten zur Applikation des Lotes“ hat die Professur für Fügetechnik und Montage der Technischen Universität Dresden 2016 als Forschungsantrag bei der AiF eingereicht. Die Thematik wurde 2017 bewilligt. Als Idee liegt das im Stand der Technik beschriebene Reibauftragen zu Grunde, welches in dem Projekt durch eine Hybridisierung zum Aufreiben von Lot genutzt werden soll. Die Ziele das Verfahren an einer Anlage umzusetzen, Bauteile vorzubeloten und mit der Belotung zu löten wurden erreicht. Die Ergebnisse werden in diesem Bericht vorgestellt.

Dazu wird im Stand der Technik das Löten und die Lötverbindung sowie das Beschichten vorgestellt. Im Anschluss wird das Verfahrensprinzip von Reibprozessen am Beispiel des Reibschweißens erläutert, bevor auf den Prozess des Reibbeschichtens eingegangen wird. Auf diesem Prozess baut das Forschungsprojekt auf.

Im weiteren Verlauf des Berichts wird die Zielstellung des Forschungsprojektes, im Speziellen der Einsatz einer Widerstandserwärmung als zusätzliche Energiequelle, konkretisiert und die dem Projekt zu Grunde liegende Methodik vorgestellt. Im Abschnitt Anlagentechnik wird auf die aufgebauten und adaptierten Beschichtungsanlagen und weitere eingesetzte Anlagentechnik eingegangen. Es wird herausgehoben, was relevante Elemente der aufgebauten Beschichtungsanlagen für eine industrielle Umsetzung sind.

Die Ergebnisdiskussion orientiert sich in Ihrem Aufbau an der erläuterten Methodik und bestätigt zunächst durch Versuche die Funktionalität des entwickelten Schleifkontakts. Im Anschluss wird die Anlagenerweiterung an einer industriellen Beschichtungsanlage angebracht. Versuche zeigen, dass die Beschichtungsanlage mit ihrer Nachsetzgeschwindigkeit nicht für den Prozess notwendige Kriterien erfüllt. Mit einer umgerüsteten Fräsmaschine, welche im Abschnitt Anlagentechnik beschrieben ist, werden zur Validierung verwendbare Hybrid-Reibbeschichtungen erzeugt und das aufgestellte Wirkmodell der konduktiven Erwärmung bestätigt. Der Schwerpunkt der Versuche liegt auf Versuchen mit Ni620-Lot. Die Validierung der Löteigenschaften zeigt, dass Lötverbindungen, welche mit durch Lotapplikation mit Hybrid-Reibbeschichten erzeugt wurden, mit durch Lotpaste erzeugten Verbindungen vergleichbar sind und gute Lötresultate liefern.

Die Ergebnisse zeigen somit, dass mit Einsatz einer geeigneten Maschine das Hybrid-Reibbeschichten als Prozess zur Lotapplikation einsetzbar ist.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben (IGF-Nr. 18.796 BR / DVS-Nr. 07.087) der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für diese Unterstützung sei gedankt.

Die Autoren bedanken sich bei den mitwirkenden Studenten, die durch ihre Studien- und Abschlussarbeiten zum Gelingen des Vorhabens beigetragen haben.

Außerdem sei an dieser Stelle den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses und weiteren Personen für die Unterstützung, Mitarbeit und die wertvollen fachlichen Hinweise gedankt.

Inhalt

1	Stand der Technik	10
1.1	Löten und die Lötverbindung.....	10
1.2	Beschichten	12
1.3	Reibprozesse.....	13
1.4	Prozessdarstellung des Reibbeschichtens	15
2	Forschungsziele und -idee	19
3	Methodik.....	21
4	Anlagentechnik.....	24
4.1	Beschichtungsanlage 1 - Horizontale Fräsmaschine	24
4.2	Beschichtungsanlage 2 – RALö Anlage der Firma SITEC Industrietechnologie GmbH	26
4.3	Beschichtungsanlage 3 - Vertikale Fräsmaschine	27
4.4	Industrie-Vakuumofen Typ Tesla PZ 810.....	31
4.5	Konduktivprüfstand	31
4.6	Chromatisch-konfokale Mikroskopie zur Oberflächentopo- graphiemessung	32
5	Versuchsergebnisse und Diskussion	34
5.1	Phase 1 – Organisation der Anlage und des Materials, Konzept- und Konstruktionsvalidierung.....	34
5.2	Phase 2 – Konstruktive Adaption d. Schleifkontakts, Inbetriebnahme und Versuche bei SITEC Industrietechnologie GmbH.....	35
5.3	Phase 3 – Anlagenwechsel, Konstruktive Adaption, Versuche.....	45
5.3.1	Hybrid – Reibbeschichtung Lot: CW008A.....	47
5.3.2	Hybrid – Reibbeschichtung Lot: Ni620	49
5.3.3	Probenverzug im Beschichtungsprozess.....	52
5.3.4	Haftfestigkeitsbewertung der erzeugten Schichten	55
5.4	Phase 4 – Modelbildung, Validierung und Umweltverträglichkeit.....	58
5.4.1	Modellbildung.....	58
5.4.2	Validierung des Hybrid-Reibbeschichtens als Verfahren zur Belotung.....	61
5.4.3	Bewertung der Umweltverträglichkeit.....	69

6	Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen.....	72
7	Erläuterung zur Verwendung der Zuwendungen	74
8	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen	75
8.1	Innovationspotential einer oder mehrerer Wirtschaftszweige.....	75
8.2	Potenzieller Nutzerkreis vor dem Hintergrund der adressierten Zielgruppe	75
8.3	Beitrag zur Entstehung neuer bzw. deutlicher Erweiterung bestehender Geschäftsfelder	75
9	Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	77
10	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts.....	78
11	Anhang – Phase 2	80
12	Anhang – Phase 3	82
13	Literaturangaben.....	92

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einordnung des Lötens in die Fertigungsverfahren mit Markierung der für dieses Projekt relevanten Untergruppen nach [2].....	10
Abbildung 2: Kapillarer Fülldruck p_k beim Löten in Abhängigkeit von der Spaltbreite b [5].....	12
Abbildung 3: a) Geometrische Reibungstheorie; b) Deformationstheorie zur Reibung; nach [8].....	14
Abbildung 4: Unterteilung des Reibschweißens nach [11].....	15
Abbildung 5: Reibbeschichtungsprozess [13].....	16
Abbildung 6: Thermo-mechanisches Model mit bewegtem Substrat während dem Reibbeschichten nach [16]	17
Abbildung 7: Stromunterstütztes Rührreibschweißen [20]	20
Abbildung 8: Ablaufplan für das Forschungshaben IGF 18.796 BR.....	21
Abbildung 9: Ergebnisbezogene chronologische Projektunterteilung.....	23
Abbildung 10: a) Schleifkontakt im eingebauten Zustand (Phase 1); b) Schleifkontakt als 3D Zeichnung (Phase 1)	25
Abbildung 11: Horizontale Fräsmaschine (Anlage 1 – Phase 1 und 3) mit Vorrichtung	26
Abbildung 12: Vertikale Fräsmaschine (Anlage 3 – Phase 4) mit Vorrichtung und Messtechnik	28
Abbildung 13: Pneumatisch, kraftgesteuerte Probenaufnahme.....	29
Abbildung 14: Schleifkontakt und Verbrauchsmaterialeinspannung	30
Abbildung 15: Industrie-Vakuumofen Typ Tesla PZ 810.....	31
Abbildung 16: Aufbau des Konduktivprüfstands	32
Abbildung 17: Konfokale Mikroskopie (links) und chromatisch-konfokale Mikroskopie (rechts) - Funktionsprinzip [28, S. 31 ff.]	33
Abbildung 18: Stromübertragung mit Schleifkontakt über Passstift auf Substrat ($I = 1kA; tS = 1s$)	35
Abbildung 19: Stromübertragung mit Schleifkontakt über Passstift auf Substrat ($I = 1kA; tS = 3s$)	35
Abbildung 20: IST-Zustand – Vergleich der Versuchsergebnisse.....	37
Abbildung 21: Exzentrizität zwischen Bolzen und Welle	38
Abbildung 22: Verformung eines dünnwandigen Rohres bei 500 N axialer Kraft....	39
Abbildung 23: Versuche mit Wirkenergieüberlagerung mit Kupfer auf C45.....	40
Abbildung 24: Versuche mit Wirkenergieüberlagerung mit Nickel auf C45	41
Abbildung 25: Temperatur – Versuch g (2 kN, 2400 U/min, 24 U/min).....	41
Abbildung 26: Axiale Kraft – Versuch g (2 kN, 2400 U/min, 24 U/min).....	42
Abbildung 27: Bolzendrehzahl – Versuch g (2 kN, 2400 U/min, 24 U/min).....	43
Abbildung 28: Temperatur – Versuch h (0,4 kN, 2400 U/min, 24 U/min, 1,5 kA)	44

Abbildung 29: Axiale Kraft – Versuch h (0,4 kN, 2400 U/min, 24 U/min, 1,5 kA)	44
Abbildung 30: Ni620 – Lotbolzendefekte	47
Abbildung 31: Hybrid – Reibbeschichtung Lot: CW008A, Substrat: S235	47
Abbildung 32: Stromimpulsstruktur zur Konzentration der Wärmeentwicklung.....	48
Abbildung 33: Hybrid – Reibbeschichtung Lot: CW008A, Substrat: 1.4301	48
Abbildung 34: Eingesetzte Bolzengeometrievarianten.....	49
Abbildung 35: Hybrid – Reibbeschichtung Lot: Ni620, Substrat: S235.....	50
Abbildung 36: Hybrid – Reibbeschichtung Lot: Ni620, Substrat: 1.4301.....	50
Abbildung 37: Teilfaktorielles Parameterfeld; Lot: Ni620, GW: 1.4301; Konstante Parameter: Kraft, Stromstärke, Stromzeit; Variierte Parameter: Vorschub, Drehzahl, Reibbolzenneigungswinkel.....	51
Abbildung 38: Teilfaktorielles Parameterfeld; Lot: Ni620, GW: 1.4301; Konstante Parameter: Drehzahl, Vorschub, Reibbolzenneigungswinkel; Variierte Parameter: Kraft, Stromzeit, Stromstärke.....	52
Abbildung 39: Verlötete Scherzugprobe mit Markierung des durch Hybrid- Reibbeschichten beeinflussten Bereichs	53
Abbildung 40: Konofokalmessung – links: Ausgangszustand; rechts: Darstellung des Messfelds	53
Abbildung 41: Konfokalemessung – links: Messung nach drei Beschichtungsspuren; rechts: Nummerierung der Beschichtungsspuren	54
Abbildung 42: Lot: Ni620, GWST: 1.4301; links: Krümmungsbewertung unter dem Mikroskop; rechts: Bewertungsversuch einer Wärmeeinflusszone.....	55
Abbildung 43: Haftfestigkeitsprüfung; links: Versuchsaufbau, rechts: Versuchsergebnis	55
Abbildung 44: Kraft-Weg-Diagramm der ausgewerteten Proben Ni620 auf 1.4301	56
Abbildung 45: Einzustellende Scherfestigkeit und Temperatur	58
Abbildung 46: Links: Temperaturverteilung in einem Kupferbolzen nach 10 s; rechts: Temperaturverteilung in einem Nickelbolzen nach 10s; Substrat: 1.4301 ...	61
Abbildung 47: Benetzungsdokumentation von Ni620 appliziert durch Hybrid- Reibbeschichten auf 1.4301	62
Abbildung 48: Auflötung mit Ni620 appliziert durch Hybrid-Reibbeschichten auf 1.4301.....	63
Abbildung 49: Querschnitt der Auflötung mit Ni620 auf 1.4301	63
Abbildung 50: Auflötung mit Ni620 appliziert durch Hybrid-Reibbeschichten auf S235.....	64
Abbildung 51: Querschnitt der Auflötung mit Ni620 auf S235	64
Abbildung 52: Benetzungsdokumentation von CW008A appliziert durch Hybrid- Reibbeschichten auf S235	65
Abbildung 53: Querschnitt der Auflötung mit CW008A auf S235	66

Abbildung 54: Auflötung mit CW008A appliziert durch Hybrid-Reibbeschichten auf S235.....	66
Abbildung 55: Lot: Ni620; Grundwerkstoff: S235; Scherzugauswertung – Kraft-Weg-Diagramm	67
Abbildung 56: Lot: Ni620; Grundwerkstoff: 1.4301; Scherzugauswertung – Kraft-Weg-Diagramm.....	68
Abbildung 57: Aufbau Rauchemissionsmessungen.....	70
Abbildung 58: Bolzendrehzahl – Versuch h (0,4 kN, 2400 U/min, 24 U/min, 1,5 kA)	80
Abbildung 59: Temperatur – Versuch j (0,4 kN, 2400 U/min, 20 U/min, 1,5 kA).....	80
Abbildung 60: Axiale Kraft – Versuch j (0,4 kN, 2400 U/min, 20 U/min, 1,5 kA).....	81
Abbildung 61: Bolzendrehzahl – Versuch j (0,4 kN, 2400 U/min, 20 U/min, 1,5 kA) .	81
Abbildung 62: Konfokalemessung – links: Messung nach einer Beschichtungsspur; rechts: Nummerierung der Beschichtungsspuren	90
Abbildung 63: Konfokalemessung – links: Messung nach zwei Beschichtungsspuren; rechts: Nummerierung der Beschichtungsspuren	90
Abbildung 64: Kraft-Weg-Diagramm der ausgewerteten Proben CW008A auf S235	91
Abbildung 65: Kraft-Weg-Diagramm der ausgewerteten Proben Ni620 auf S235 ...	91

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschichtungsverfahren mit Näherungswerten typischer Schichtdicken nach [6].....	13
Tabelle 2: Prozessablauf des Reibbeschichtens nach [17].....	17
Tabelle 3: Vergleich relevanter Beschichtungsverfahren	19
Tabelle 4: Parameter der Reibbeschichtanlage der Firma SITEC Industrietechnologie GmbH.....	22
Tabelle 5: Leistungskennwerte der eingesetzten Anlage 1	24
Tabelle 6: Leistungskennwerte der eingesetzten Anlage 2	27
Tabelle 7: Leistungskennwerte der eingesetzten Fräsmaschine 2.....	28
Tabelle 8: Versuchsparameter - vergleichenden Versuche.....	36
Tabelle 9: Abweichung der Versuchsproben zwischen den Versuchen von Nguyen und den Vergleichsversuchen.....	37
Tabelle 10: Versuchsparameter – Grundwerkstoffweiterung FeCr Stahl.....	39
Tabelle 11: Versuchsparameter – Erste Versuche zur Wirkenergieüberlagerung mit Kupfer	40
Tabelle 12: Versuchsparameter – Erste Versuche zur Wirkenergieüberlagerung mit Nickel	40
Tabelle 13: Parameter Lot: CW008A, Substrat: S235	47
Tabelle 14: Parameter Lot: CW008A, Substrat: 1.4301	48

Tabelle 15: Parameter Lot: Ni620, Substrat: S235.....	49
Tabelle 16: Parameter Lot: Ni620, Substrat: 1.4301	51
Tabelle 17: Temperaturerhöhung durch Reibenergie beim Hybrid-Reibbeschichten und Reibbeschichten	59
Tabelle 18: Ausbringrate des Prozesses mit Ni620 auf 1.4301	69
Tabelle 19: Filtergewicht der Rauchemissionsmessungen	70
Tabelle 20: Maßnahmen zum Transfer der Ergebnisse während der Projektlaufzeit.....	77
Tabelle 21: Maßnahmen zum Transfer der Ergebnisse nach der Projektlaufzeit.....	78

Formelverzeichnis

Formel 1: Wärmeleistung	59
Formel 2: Wärmedichte	59
Formel 3: Temperaturgradient	59
Formel 4: Temperaturerhöhung.....	59
Formel 5: Stromwärme	60
Formel 6: Wärmeenergie	60

1 Stand der Technik

1.1 Löten und die Lötverbindung

Löten ist in der DIN 8580 genormt und wird unter den Fertigungsverfahren der Hauptgruppe 4 – Fügen, genauer 4.7 – Fügen durch Löten, zugeordnet [1]. Die vollständige Einordnung ist in Abbildung 1 aufgeführt.

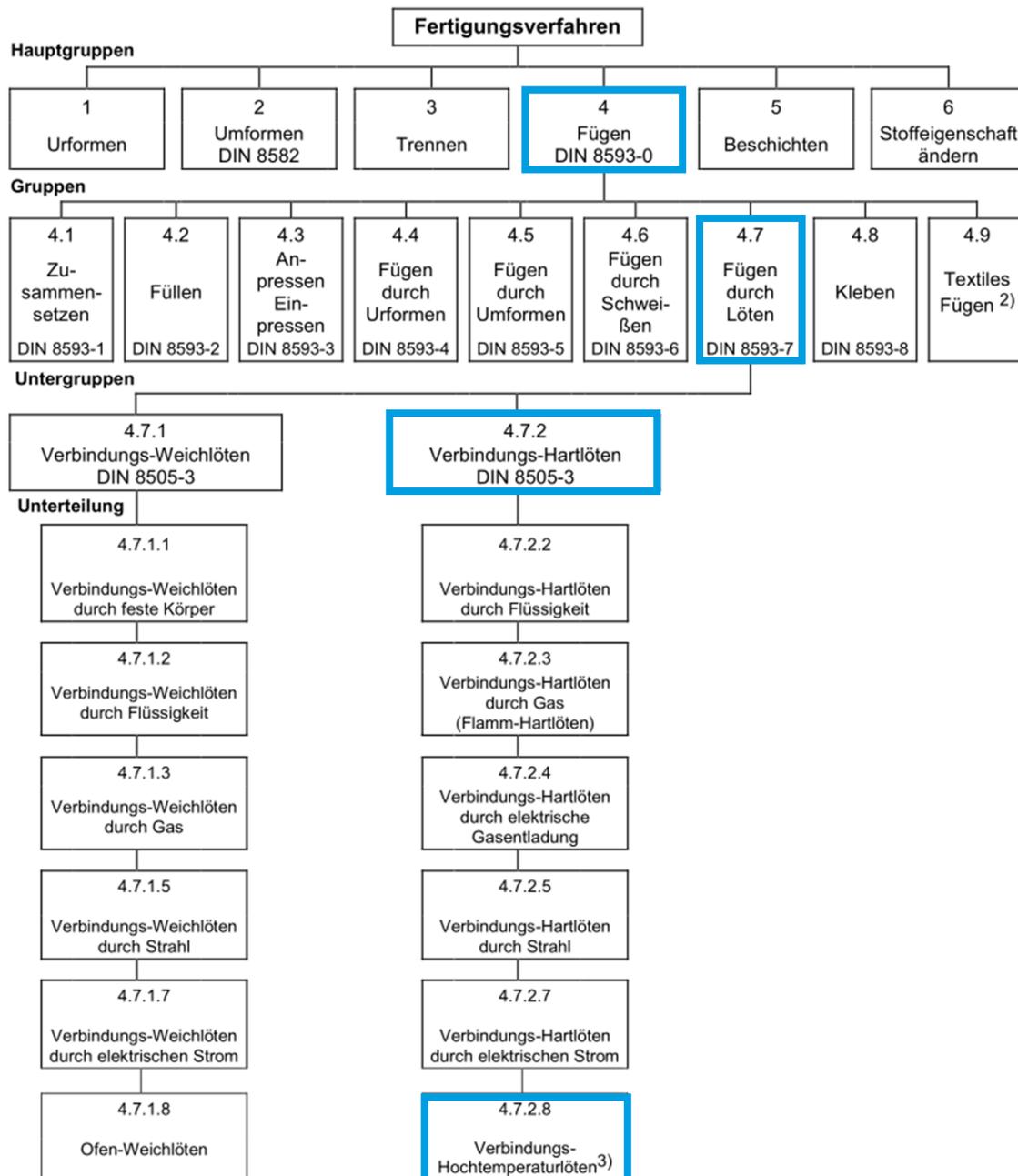


Abbildung 1: Einordnung des Lötens in die Fertigungsverfahren mit Markierung der für dieses Projekt relevanten Untergruppen nach [2]

Mit ³⁾ wird in Abbildung 1 angemerkt, dass der Begriff des Hochtemperaturlötens nur in Deutschland genormt ist und von ISO und CEN nicht festgelegt wird. Das Verfahren ist jedoch technisch und wirtschaftlich von Bedeutung, stellt aber heute eine Untergruppe des Hartlötens dar.

Das Löten ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von Grundwerkstoffen. Charakteristisch ist das Schmelzen eines Zusatzwerkstoffs in Form eines Fertiglots oder Reaktionslots. Die Schmelztemperatur dieser Lote liegt unterhalb der Schmelztemperatur des Grundwerkstoffes. Dieser wird im Gegensatz zum Schweißen nicht aufgeschmolzen. Ein weiterer Unterschied zum Schweißen ist, dass Grundwerkstoff und Lot in ihrer chemischen Zusammensetzung unterschiedlich sind [3].

Die Lötverbindung ist nach Wittke [4] eine „Stoffschlussverbindung zwischen Werkstoffen ungleicher chemischer Zusammensetzung und gleicher chemischer Bindung“. Eine Lötverbindung setzt sich aus dem Grundwerkstoff der Lötkonstruktion, einem verfahrensbeeinflussten Grundwerkstoff, einer Übergangsphase in der Lötzone und dem Lötgut zusammen.

Löten als Fügeverfahren wird aufgrund technischer und wirtschaftlicher Vorteile zum stoffschlüssigen Fügen in allen Bereichen der Industrie, vor allem aber bei dünnwandigen Konstruktionen oder schlecht zugänglichen Fügestellen eingesetzt. Vorteile sind u.a. der geringe Automatisierungsaufwand, die geringe thermische Beeinflussung der Werkstücke, das selbstständige Fließen des Lotes und die Möglichkeit viele Fügestellen in einem Prozessschritt zu bearbeiten. Zur Gestaltung einer Lötverbindung sind u.a. der Zustand der zu lötenden Oberfläche, die Formänderung der Einzelteile unter Wärmeeinfluss und die Montage-/Lötspaltbreite vor allem mit Bezug auf den kapillaren Fülldruck zu beachten [3]. Der kapillare Fülldruck ist entscheidend für die Spaltfüllung des Lots und wird in Abbildung 2 verdeutlicht. Ein Lötspalt zwischen 0,05 mm bis 0,2 mm eignet sich demnach für das Maschinenlöten beispielsweise im Vakuumofen und Schutzgasdurchlauföfen und gilt eingehalten zu werden [5]. Zu beachten ist, dass es auch Lötverfahren gibt, bei denen kein Verschießen des Lotes in der beschriebenen Form eintritt, beispielsweise das Reaktivlöten durch Ausnutzung der Diffusion beispielsweise von Silber und Kupfer im eutektischen Verhältnis. Hier ist kein derartiger Spalt einzuhalten.

Neben der konstruktiven Gestaltung, bei der im Optimalfall die zu verbindenden Einzelteile durch Zusammenstecken ihre gegenseitige Lage selbstständig beibehalten, sorgen häufig kostenintensive Lötvorrichtungen für die Lagefixierung der Einzelteile während des Lötprozesses [3]. Lotapplikation erfolgt entweder per An- oder Einlegen

(Lotfolien, -paste, -draht oder -formteile) oder die Werkstücke sind bereits in Form einer Beschichtung vorbelotet. Im Fall von An- oder Einlegen muss konstruktiv ein Lotdepot vorgesehen werden [5].

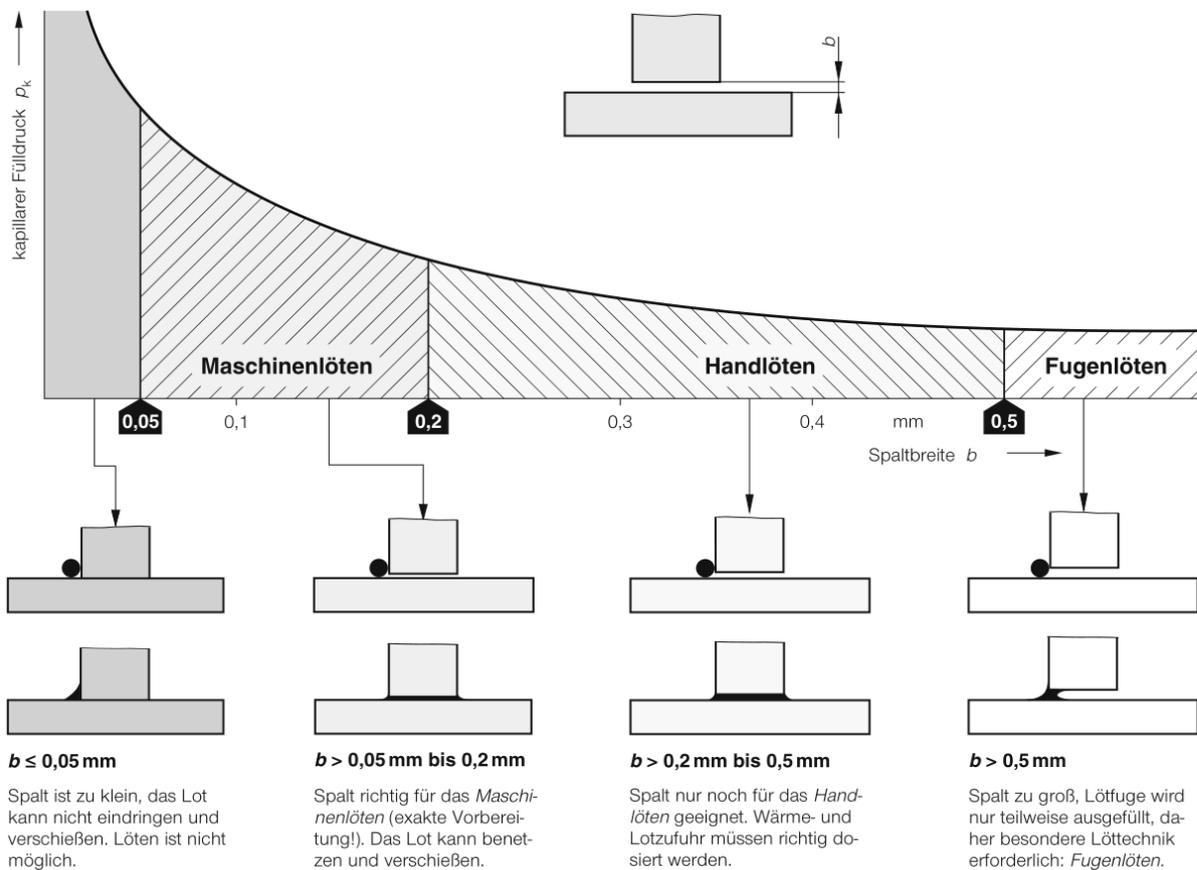


Abbildung 2: Kapillarer Fülldruck p_k beim Löten in Abhängigkeit von der Spaltbreite b [5]

1.2 Beschichten

Beschichten gilt ebenso wie Fügen als ein Fertigungsverfahren und ist in der DIN 8580 als Hauptgruppe 5 aufgeführt (s. Abbildung 1). Die Hauptgruppe 5 ist in sich in 6 Gruppen unterteilt. Beschichten ist meistens nach dem Aggregatzustand der Ausgangsstoffe zur Beschichtung kategorisiert [1]. Das Verfahren beschäftigt sich mit der Oberfläche eines Festkörpers (Oberflächentechnik). Verfahrensbeispiele sind u.a. thermisches Spritzen, Kaltgasspritzen, elektrolytisches Abscheiden und Walzplattieren. Generell werden vor dem Auftragen einer Schicht zunächst die äußeren Grenzschichten (Oxidschicht, Wasserfilm, Fett, sonstige Verunreinigungen) durch geeignete Vorbehandlung entfernt, da diese die Haftung der Beschichtung verschlechtern. [6] Tabelle 1 zeigt beispielhaft Verfahren der Oberflächentechnik.

Tabelle 1: Beschichtungsverfahren mit Näherungswerten typischer Schichtdicken nach [6]

Aggregatzustand	Beispiel	Schichtdicke /μm
(elektro-) chemische Lösung	Galvanik (u.a. Nickel, Zinn, Zink, Kupfer)	1- 300
teigige, flüssige Phase	Thermisches Spritzen (u.a. Flamspritzen, Plasmaspritzen)	50 – 400
	Auftragsschweißen (u.a. MIG-/WIG, Unterpulverauftrags-schweißen)	1000 - 20000
	Auftragslöten (u.a. Fliese, Suspensionen)	50 - 4000
feste Phase, Pulver	Sintern (u.a. Wirbelsintern)	200 - 2000
Dampf-, Gasphase, Plasma	Physikalische Gasphasenabscheidung (u.a. Sputtern)	0,1 - 8

1.3 Reibprozesse

Das Auftragen/Beschichten durch einen Reibprozess ist nicht genormt und daher nicht in Tabelle 1 aufgeführt. In Fügeprozess z.B. dem Reibschweißen wird Reibung bereits als Energiequelle zum Fügen eingesetzt [5]. Beim Reibschweißen werden die Werkstücke an den Stoßflächen durch Reibung erwärmt und unter Kraft verschweißt [7].

Bei Reibung zwischen Körpern entsteht eine der Bewegung der Körper entgegengesetzt Kraft, die Reibkraft [8]. Diese berechnet sich aus der Normalkraft der Körper zueinander F_N und einem Reibwert μ .

$$F_R = F_N * \mu$$

Die aus Reibkraft resultierende Arbeit W_R bei Reibung über eine definierte Strecke beeinflusst entsprechend der Energieerhaltung die thermische Energie E_{th} der Körper.

$$W_R = E_{th} = \int F_R(x)dx$$

Zur Entstehung des Reibwertes existieren unterschiedliche Theorien [9].

Geometrische Theorie

Das Auftreten von Reibungskräften wird mit der Oberflächenbeschaffenheit der Körper begründet. Unter der Annahme, dass alle Körper absolut hart sind, kann der Reibwert vom Tangens des Neigungswinkels einer einzelnen Unebenheit bestimmt werden. Abbildung 3a verdeutlicht diese Theorie der Unebenheiten.

Adhäsionstheorie

Ein Überwinden molekularer Wechselwirkungskräfte zwischen zwei sich relativ zueinander bewegenden Festkörpern dient als Erklärung für den Reibwert und die resultierende Reibkraft.

Deformationstheorie

Reibkräfte entstehen aus der Deformation eines bestimmten Volumens im Zusammenhang mit der Arbeit zur Überwindung gegenseitig verhakter Mikrounebenheiten der aufeinander reibenden Körper. Abbildung 3b veranschaulicht diesen Ansatz.

Kombinierende Theorie

Eine Kombination der o.g. Theorien ergibt, dass die Reibkraft als ein Ergebnis der Überwindung von Kohäsionskräften zwischen den Oberflächen und den Mikrounebenheiten aufgefasst werden kann.

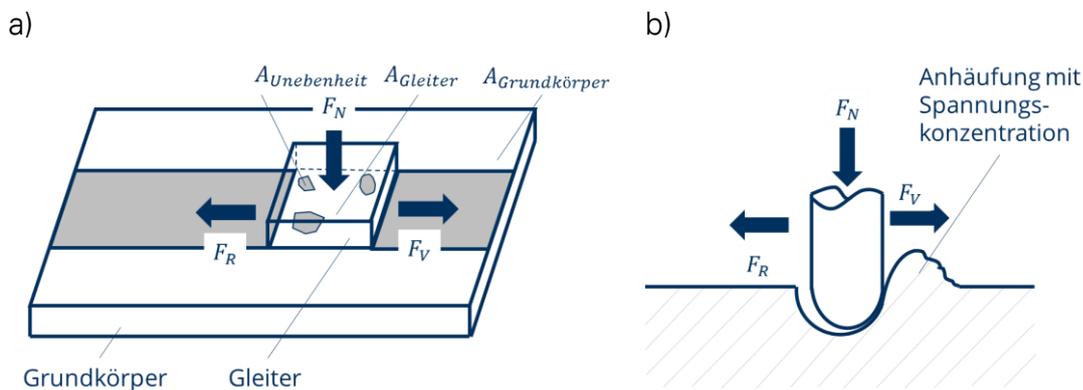


Abbildung 3: a) Geometrische Reibungstheorie; b) Deformationstheorie zur Reibung; nach [8]

Reibkoeffizient und Reibkraft hängen somit von mehreren Faktoren ab. Für das Reibschweißen konkretisiert Grünauer [10] die Faktoren wie folgt:

- Relativgeschwindigkeit der Reibflächen zueinander;

- Temperatur der Reibflächen;
- Werkstoff- und Oberflächenbeschaffenheit;
- Normalkraft;
- Steifigkeit/Elastizität der Reibflächen.

Zudem untergliedert Schmidt in seiner Dissertation von 1982 [11] bereits das Reibschweißen in Verbindungsreibschweißen und Reibauftragsschweißen entsprechend Abbildung 4.

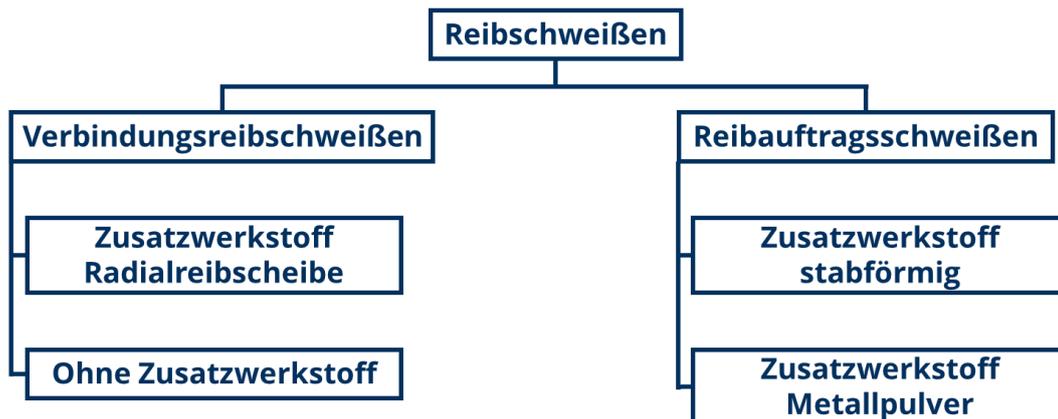


Abbildung 4: Unterteilung des Reibschweißens nach [11]

Eine Erweiterung des in Abbildung 4 rechts aufgeführten Reibauftragsschweißens über das Auftragen von Werkstoffen auf Substraten mit chemisch gleicher Zusammensetzung reduziert den Begriff Reibauftragsschweißen zu Reibauftragen (eng. friction surfacing). An diesem Prozess steigt das Interesse der Forschung und industrieller Anwender, wie ein steigender Veröffentlichungsumfang seit dem Jahr 2000 und erste spezifische Anlagen, wie z.B. die Anlage von Nguyen [12], zeigen.

1.4 Prozessdarstellung des Reibbeschichtens

Das Reibbeschichten ist ein Festkörperprozess, welcher sich ausschließlich auf die Reibung zwischen Substratoberfläche und einem Reibbolzen zur Wärmeenergieerzeugung stützt. Die Materialien werden so oberhalb ihrer Rekristallisationstemperatur, aber unterhalb der Schmelztemperatur bearbeitet. Um den Reibbolzen und das Substrat einzuspannen sowie den gewünschten Vorschub zu gewährleisten ist eine Werkzeugmaschine erforderlich. Wie in Abbildung 5 dargestellt, wird bei diesem Beschichtungsverfahren ein stabförmiges Auftragsmaterial, der Reibbolzen, mit einer definierten Axialkraft auf die Oberfläche des zu beschichteten Substrats gepresst.

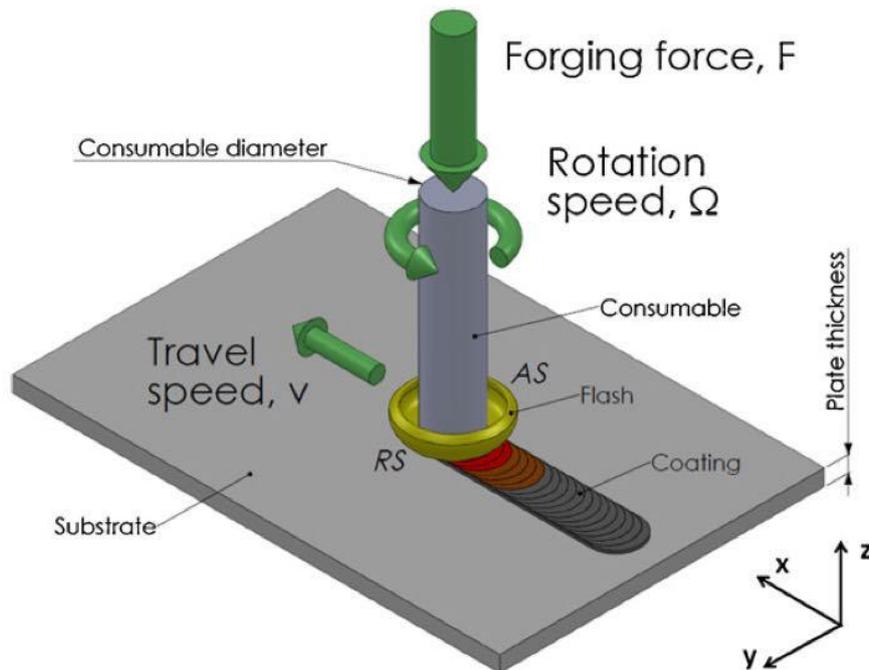


Abbildung 5: Reibbeschichtungsprozess [13]

Durch die Reibwärme entsteht eine viskoplastische Schicht an der Stabspitze. Die entstandenen Druck- und Temperaturbedingungen ermöglichen einen Interdiffusionsprozess, welcher zu einer metallischen Bindung zwischen Substrat und plastifiziertem Material führt. [14]

Der Ablauf des Reibbeschichtens gliedert sich wie in Tabelle 2 dargestellt. Die Eigenschaften der entstandenen Schicht, wie die Breite und die Dicke, sind abhängig von Prozessparametern. [15]

Das Reibbeschichten ist mit einer hohen Komplexität an Umformung verbunden. Zuerst wird durch Reibung ein viskoplastischer Festkörperbereich erzeugt, welcher anschließend in einen neuen metallurgischen Zustand gebracht wird. Dabei entstehen dreidimensionale Materialströme, die eine Verbindung der verschiedenen Materialien ermöglichen. Die Temperaturen und Fließspannungen befinden sich bei diesem Verfahren immer über der Rekristallisationstemperatur und unterhalb der Schmelztemperatur des Materials, aus welchem der Reibbolzen gefertigt ist.

Zudem beschreiben Bedford et al. [16] das in Abbildung 6 aufgeführte Wirkmechanismenschema des Prozesses. Sie unterteilen den Reibbolzen (Mechtrode) in Arbeitsbereiche (working regions), welche sich durch ihre Temperatur unterscheiden.

Tabelle 2: Prozessablauf des Reibbeschichtens nach [17]

#	Prozessschritt	Beschreibung
1	Rotation Reibbolzen	Eingestellte Drehzahl wird erreicht
2	Aufpressen d. Reibbolzens auf Substrat mit axialer Last	Erzeugen der erforderlichen Reibungswärme
3	Vorschub Reibbolzen	Verlust an Festigkeit der Bolzenspitze und Plastifizierung. Ablösen des plastifizierten Materials und Anbindung auf Substrat

Die Wärme entsteht an den Begrenzungsflächen durch die entstandenen Reibungsverluste. Allein durch plastische Verformung und Reibung kann nicht genügend Wärme erzeugt werden, um das Material aufzuschmelzen. Während des Prozesses wird Reibungswärme in den Bolzen geleitet, der dadurch entstehende Temperaturgradient ist ausschlaggebend für den Grad der Verformung. In der Anfangsphase wird durch eine kurze Verweilzeit zuerst die Kontaktfläche ausgebildet. Entscheidend für die Dicke der aufgetragenen Schicht ist der Abstand dieser Kontaktfläche zur Substratfläche, welcher während des Beschichtungsprozesses konstant zu halten ist.

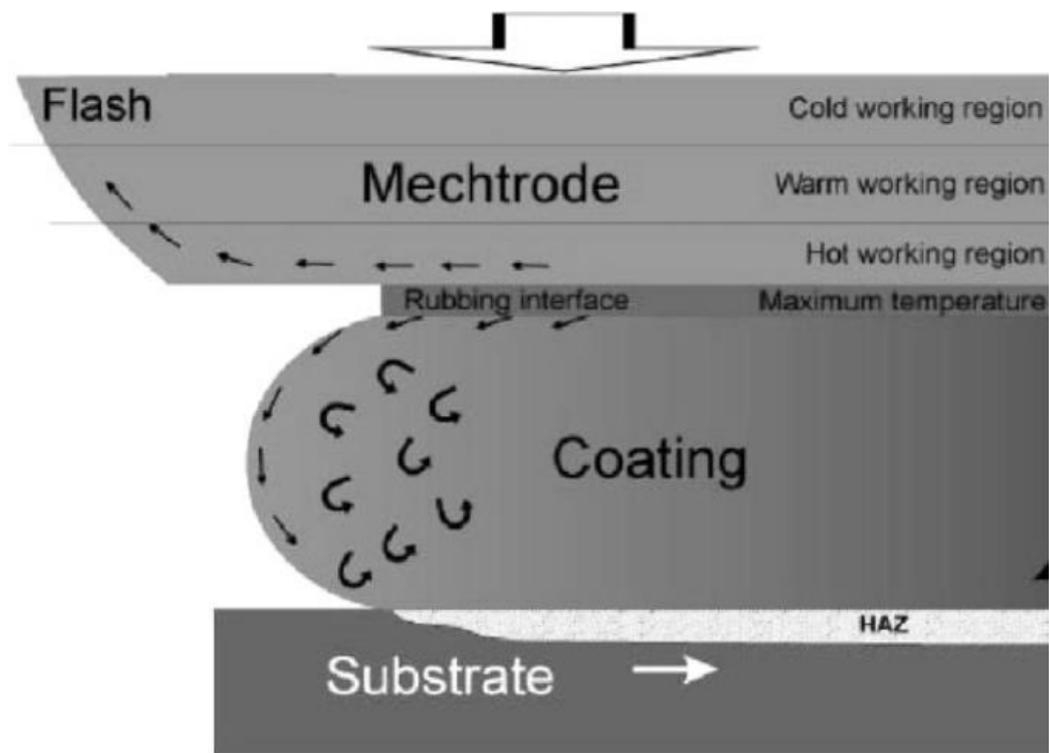


Abbildung 6: Thermo-mechanisches Model mit bewegtem Substrat während dem Reibbeschichten nach [16]

Der rotierende Reibbolzen wird ohne seitliche Begrenzung an das Substrat und mit einer definierten Axialkraft auf das Substrat gepresst, dies begünstigt die Gratbildung und somit fehlende Bindung an den Beschichtungskanten. Die beiden erwähnten Nebeneffekte sind der Grund dafür, dass die entstandene Schicht nicht genauso breit wie der verwendete Reibbolzen ist. Das Material wird in elliptischer Form, in einzelnen diskreten Schichten, mit einem kleinen Versatz, basierend auf dem Verhältnis zwischen der Drehzahl des Reibbolzens und der Vorschubgeschwindigkeit des Substrats, nacheinander abgeschieden [14]. Während des Reibbeschichtens ist es nach [18] unvermeidbar, dass ein Teil des Verbrauchsmaterials entflammt. Diese Aussage konnte in diesem Projekt nicht bestätigt werden, jedoch traten durch Spritzer Differenzen zwischen abgeschiedenem Lot und aufgeriebenem Lot auf. Das Verhältnis des abgeschiedenen Materials und insgesamt verbrauchten Materials wird durch die Abscheidungseffizienz beschrieben und ist von den Prozessparameter abhängig [18].

2 Forschungsziele und -idee

Die Analyse des aktuellen Stands der Technik zeigt, dass die Relevanz des Lötens als Fügeverfahren fortlaufend steigt, jedoch Einsparungspotentiale im Bereich der Lötvorrichtungen und der Lotapplikation bestehen. Mit an-/eingelegten Loten ist eingeschränkt Lagerungs- oder Transportiermöglichkeit gegeben, da Folien, Drähte und Formteile leicht verrutschen und Pasten mit der Zeit austrocknen und sich ablösen können. Zur Beschichtung werden aktuell Walzplattierungen oder galvanisch aufgetragene Reinmetallschichten verwendet. Nicht alle Lote (z.B. Ni-Basislote) lassen sich walzplattieren und ein dickerer Auftrag mit einer elektrochemischen Lösung ist zeitaufwendig, also kostenintensiv. Zielführend ist ein Verfahren, welches die Lote gut haftend, ohne umweltschädigende Chemikalien und lokal aufträgt.

Das im Stand der Forschung beschriebene Reibauftragen eignet sich zum Herstellen einer Verbindung zwischen Substrat und dem aufzutragenden Lot, hat jedoch prozessbedingte Einschränkungen. Vor allem die notwendigen hohen Anpresskräfte beschränken in Verbindung mit den meist dünnwandigen zu verlötenden Baugruppen den Einsatz als Lotapplikationsverfahren. Die hohen Anpresskräfte würden die Baugruppen verformen bis zerstören. Im Vergleich zu anderen relevanten Beschichtungsverfahren werden Vor- und Nachteile in Tabelle 3 gegenübergestellt.

Tabelle 3: Vergleich relevanter Beschichtungsverfahren

Beschichtungsverfahren	Vorteile	Nachteile
Thermisches Spritzen	Einfache Handhabung; Lokale Beschichtung; Manuell und automatisiert	Hoher Energieeinsatz; Masseverlust; Oberflächenqualität; Hoher Oxidanteil in der Schicht; Adsorption von Fluiden
Kaltgasspritzen	Einfache Handhabung; Lokale Beschichtung; Manuell und automatisierbar; Geringer Oxidanteil in Schicht	Hoher Energieeinsatz; Vorbehandlung (Strahlen) erforderlich; Oberflächenqualität; Adsorption von Fluiden
Galvanik	Homogene, kompakte Schicht; Oberflächenqualität; Keine Oxidanteile;	Lokale Beschichtung; Schichtdicke zeitabhängig; Chemikalien; Einschränkung bei Lotlegierungswahl
Walzplattieren	Schneller Prozess	Ebenes Substrat; Einschränkung bei Lotlegierungswahl
Lotpaste	Einfache Handhabung; Kostengünstig	Binder
Reibbeschichten	Lokale Beschichtung; Haftfestigkeit; Keine Chemikalien	Ungleichmäßige Schichtqualität; Hohe Anpresskräfte

Die Vorteile des Reibbeschichtens sind nach Tabelle 3 attraktiv für ein Belotungsverfahren. Das Forschungsvorhaben setzt somit das Ziel die Nachteile zu beseitigen und die Einsetzbarkeit nachzuweisen und umzusetzen.

Zur Reduzierung der hohen Anpresskräfte wird eine zweite Energiequelle in den Reibbeschichtungsprozess integriert. Studien [19 bis 22] haben gezeigt, dass durch eine Wirkenergieüberlagerung (z.B. zusätzliche Wärme) bessere Haftungs- und Prozessbedingungen vorliegen. So beschreibt [20] eine deutliche Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit und [19] eine Parametererweiterung und Prozessverbesserung beim Rührreibschweißen durch Einbinden einer konduktiven Widerstandserwärmung (s. Abbildung 7). In [21, 22] gehen die Autoren auf eine signifikant erhöhte Abschmelzleistung beim laserunterstützten Lichtbogenschweißen ein.

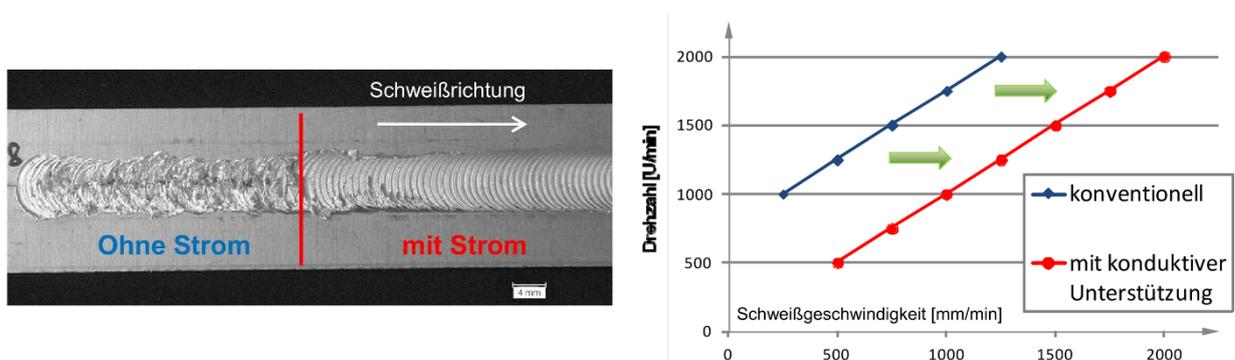


Abbildung 7: Stromunterstütztes Rührreibschweißen [20]

Die zusätzliche Energiequelle, welche das Reibbeschichten zum Hybrid-Reibbeschichten wandelt, soll entsprechend der Reibenergie direkt in der Kontaktzone zwischen Beschichtungsbolzen und Substrat eingebracht werden und im selben Prozessschritt mit dem Beschichten wirken. Aus diesem Grund eignet sich elektrischer Strom entsprechend [19, 20] (s. Abbildung 7) durch eine konduktive Widerstandserwärmung als zusätzliche Wärmeenergiequelle. Mit dieser Idee soll das Reibbeschichten zum Hybrid-Reibbeschichten weiterentwickelt werden und der Prozess als Methode zur Belotung etabliert werden.

3 Methodik

Im Rahmen der Untersuchungen werden sowohl numerische als auch experimentelle Methoden eingesetzt. Die numerischen Simulationen dienen zur Visualisierung der physikalischen Effekte. Bei den experimentellen Untersuchungen wird zwischen Lotauftrag und Lötignung, der Nutzung des aufgeriebenen Lotes zur Herstellung einer Fügeverbindung zweier Komponenten, unterschieden. Das angestrebte Herangehen ist in Abbildung 8 zusammengefasst und wird im Folgenden in Kontext gebracht.

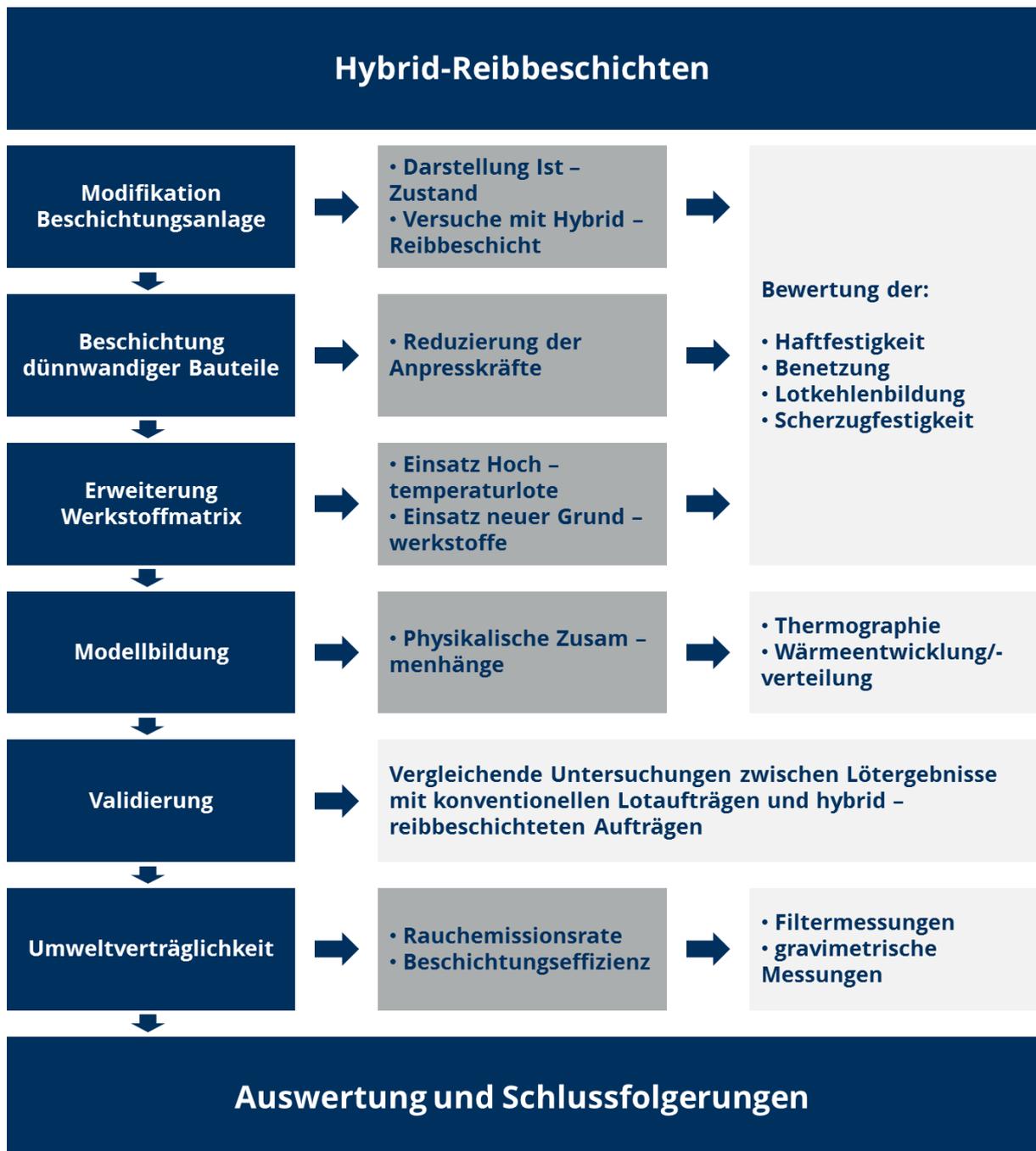


Abbildung 8: Ablaufplan für das Forschungshaben IGF 18.796 BR

Modifikation der Beschichtungsanlage

Die Modifikation des konventionellen Reibbeschichtens erfolgt an einer Maschine der Firma SITEC Industrietechnologie GmbH mit den in Tabelle 4 aufgeführten Parametern.

Tabelle 4: Parameter der Reibbeschichtanlage der Firma SITEC Industrietechnologie GmbH

Parameter	Wert
Bolzendrehzahl	max. 4000 U/min
Bolzenanpresskraft	max. 16 kN
Bauteildurchmesser	max. 120 mm
Achsverfahrlänge	max. 200 mm

Durch Reproduzieren bereits erarbeiteter Ergebnisse auf der Anlage durch Nguyen [12] wird eine Vergleichsbasis für die folgenden Hybrid-Reibbeschichtungsversuche geschaffen.

Beschichtung dünnwandiger Bauteile

Vorbelotung dünnwandiger Bauteile mit Hybrid-Reibbeschichten durch Absenkung der Anpresskräfte und Ermittlung geeigneter Parameter.

Erweiterung der Werkstoffmatrix

Aus der Literatur [14, 23 bis 25] sind erfolgreiche Reibbeschichtungen von verschiedenen Aluminiumlegierungen auf Aluminiumsubstrat und verschiedenen Stahllegierungen auf Stahl bekannt. Zwei weitere Veröffentlichungen bewerten die Beschichtungsmöglichkeiten von Inconel auf Stahl und Kupfer auf Stahl und Kupfer. Die Erweiterung beinhaltet u. a. die Verwendung von nicht rostendem Stahl als Substrat und Ni-Basisloten als Beschichtungswerkstoff.

Modellbildung

Ableiten der physikalischen Zusammenhänge beim gekoppelten Wärmeeintrag durch Vereinzelung der Effekte, im speziellen der konduktiven Erwärmung.

Validierung

In diesem Arbeitspaket werden an Versuchsbaugruppen mit hybrid-reibbeschichteter und konventioneller Lotapplikation Lötversuche im Vakuum- bzw. Schutzgaslötöfen durchgeführt und verglichen.

Umweltverträglichkeit

Untersucht wird evtl. auftretende Rauchemission nach einer an der TU Dresden für das MSG-Schweißen verwendeten Methode [41]. Zur Bestimmung der Beschichtungseffizienz wird das Beschichtungsmaterial vor und nach dem Reibbeschichten gravimetrisch untersucht.

Auswertung und Schlussfolgerung

Auswertung der Ergebnisse und Ableitung von Schlussfolgerungen und Verfahrensanweisungen.

Zum besseren Verständnis wird die Projektbearbeitung in Abbildung 9 zusätzlich in aufeinander folgende zeitliche Phasen gegliedert. Diese Phasen ergeben sich aus den im Abschnitt „Versuchsergebnisse und Diskussion“ diskutierten Ergebnissen. Die Einteilung verdeutlicht und erleichtert den Aufbau der folgenden Kapitel.

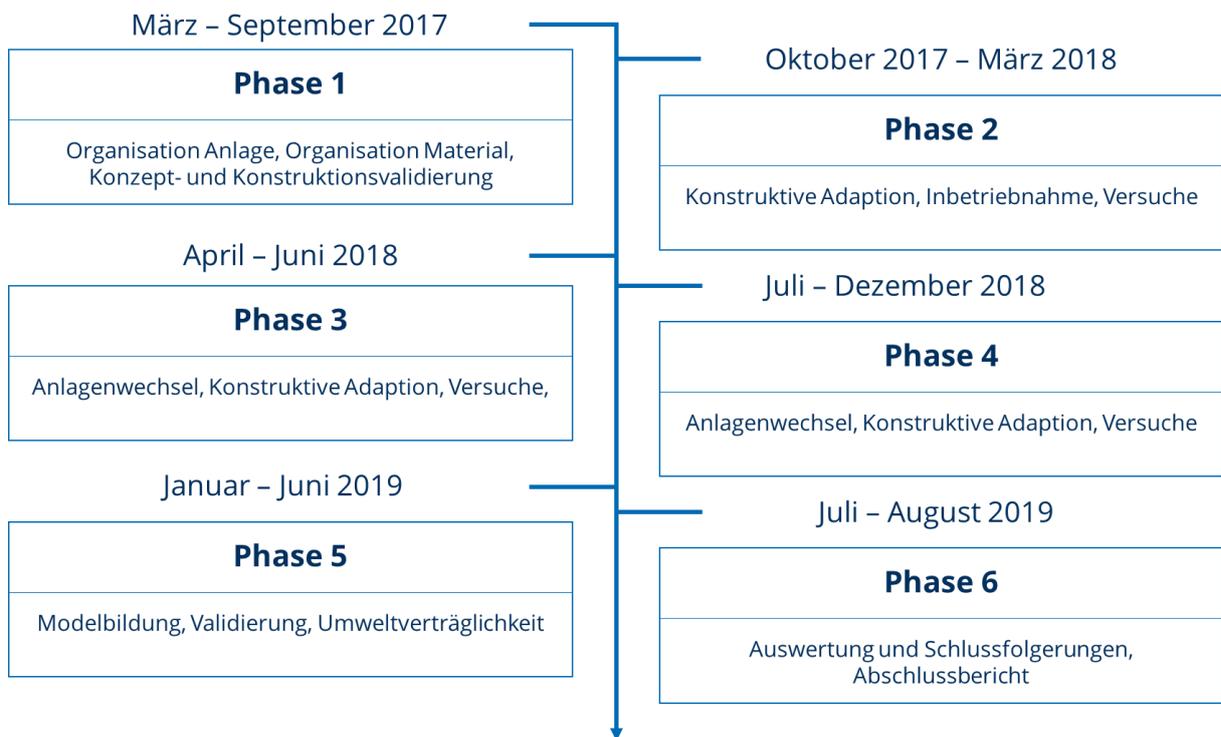


Abbildung 9: Ergebnisbezogene chronologische Projektunterteilung

4 Anlagentechnik

Im Bearbeitungsverlauf ergab sich die Notwendigkeit mehrmals die Werkzeugmaschine zur Beschichtung des Substrates mit Hybrid-Reibbeschichten zu wechseln oder zu modifizieren. In diesem Kapitel werden daher alle eingesetzten Anlagen beschrieben, sodass sich im späteren Verlauf des Berichts auf die beschriebenen Werkzeugmaschinen bezogen werden kann.

4.1 Beschichtungsanlage 1 - Horizontale Fräsmaschine

Zielstellung

Diese Fräsmaschine ist in Phase 1 primär zum Funktionsnachweis des konstruierten Schleifkontakts vor den Versuchen an der Maschine der Firma SITEC Industrietechnologie GmbH eingesetzt worden und in Phase 3 auch für weiterführende Versuche erneut in Betrieb genommen worden.

Maschinenbeschreibung

Die für die Versuche relevanten Leistungsdaten der Fräsmaschine sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Leistungskennwerte der eingesetzten Anlage 1

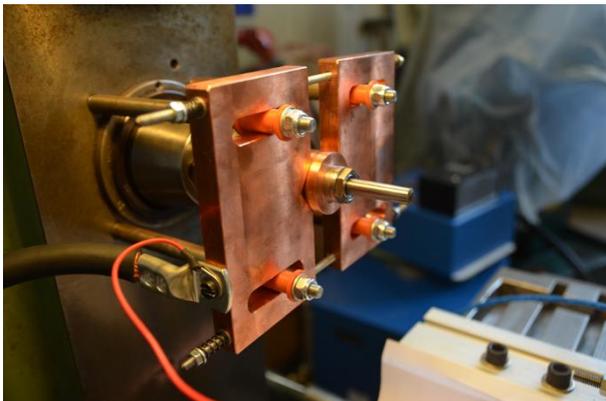
Horizontale Fräsmaschine der Firma VEB Werkzeugmaschinenfabrik Engelsdorf		
Leistung	2,8	kW
Vorschub	stufenweise max. 250	$\frac{mm}{min}$
Drehzahl	stufenweise max. 710	$\frac{1}{min}$
Tischschwenkung	± 30	°

Abbildung 10 zeigt den Aufbau aus Phase 1. Auf dem Werkzeuggestisch ist eine Anpressvorrichtung mit Balgzylinder montiert. Die Spindel wurde mit einem selbst konstruierten Schleifkontakt versehen. Nach vorgehenden Fachgesprächen [26] hat sich herausgestellt, dass Schleifkohlen die abgeschätzte Stromstärke von bis zu 4 kA im vorhandenen Bauraum der Anlage SITEC nicht übertragen können. Im Folgenden werden die eingesetzten Komponenten erläutert.

- Markierung 1 in Abbildung 11: Einspannung des Verbrauchmaterials inkl. Schleifkontakt
Die Bolzenaufnahme besteht aus einer Kupferwelle mit Stirnbohrung (s. Abbildung 10b – Markierung 2). Das Ende, welches in der Spannzange aufgenommen wird,

ist mit einer Kunststoffhülse isoliert, so dass kein Fehlstrom über die Anlage fließen kann (s. Abbildung 10b – Markierung 3). Sowohl die Kupferwelle als auch die Schleifkontaktbacken bestehen aus Cu-ETP. Die Schleifkontaktbacken kontaktieren die Kupferwelle über einen Dreilinienkontakt und werden mit gespannten Federn angepresst. Nur die in Abbildung 10b mit Markierung 1 markierte Schleifkontaktbacke wird in Phase 1 mit einem Pol der Stromquelle versehen (s. Abbildung 10a). Der Reibbolzen wird mit einem Ringspannelement der Firma Ringspann (Trantorque Mini Metric; Größe 12x23) in der Kupferwelle mit Kontakt zum Kupfer an der Senkfläche der Bohrung eingespannt.

a)



b)

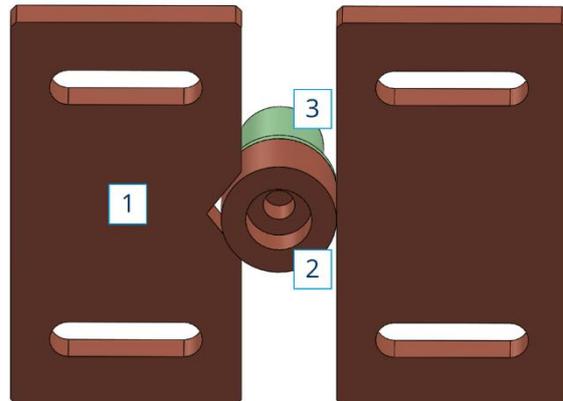


Abbildung 10: a) Schleifkontakt im eingebauten Zustand (Phase 1); b) Schleifkontakt als 3D Zeichnung (Phase 1)

- Markierung 2 in Abbildung 11: Substratanpressung durch einen Zylinderbalg mit Führung
Das Substrat an diesem Versuchsstand sind ausschließlich Bleche. Die Bleche werden auf ein Säulenführungsgestell gespannt. Das gesamte Gestell wird mit einem pneumatischen Balgzylinder EB250 von Festo gegen die Mechtrode gepresst.
- Markierung 3 in Abbildung 11: Stromquelle HyMicro zur Widerstandserwärmung
Die Stromquelle zur Widerstandserwärmung ist eine mobile Punktschweißstromquelle der Firma Alia Technik GmbH. Der normale Anwendungsfall dieser Maschine ist das Mikropunktschweißen. Sie liefert Stromstärke zwischen 0,05 – 4 kA bei einer maximalen Spannung von 10 V. Zudem kann der gewünschte Stromverlauf eingestellt werden.

Erkenntnisgewinn

Diese Fräsmaschine war zur anfänglichen Überprüfung des Schleifkontakts in Phase 1 ausreichend. Bei den anschließenden Versuchen in Phase 3 stellte sich jedoch heraus,

dass die Fräsmaschine nicht ausreichend Leistung liefert und nach einem anfänglichen Auftrag der Reibbolzen angelötet wurde. Das aufgebrachte Drehmoment war nicht ausreichend um ein Abscheren vom Reibbolzen zu ermöglichen. Der angelötete Reibbolzen bremste die Spindel bis zum Stillstand aus. Zusätzlich zur Drehzahl und Kraft ist somit bei dem Auslegen einer entsprechenden Beschichtungsanlage die Leistung insbesondere mit Bezug auf das Drehmoment zu beachten.

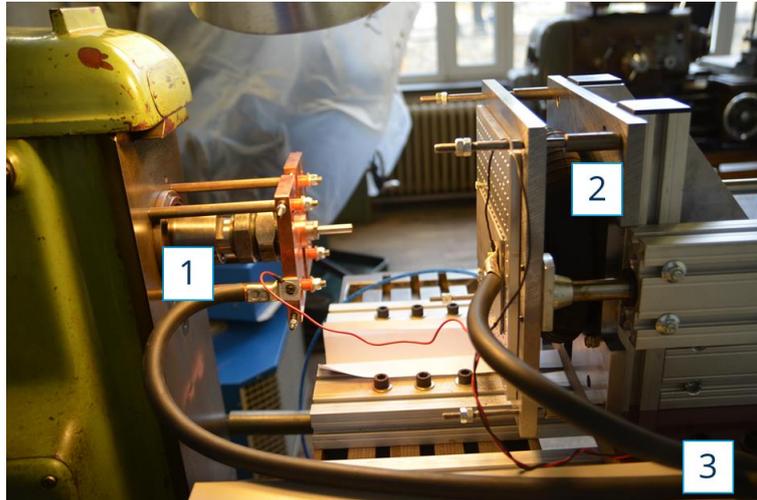


Abbildung 11: Horizontale Fräsmaschine (Anlage 1 – Phase 1 und 3) mit Vorrichtung

Eine weitere Nutzung der Beschichtungsanlage 1 war nicht zielführend.

4.2 Beschichtungsanlage 2 – RALö Anlage der Firma SITEC Industrietechnologie GmbH

Zielstellung

Die Werkzeugmaschine sollte zur Durchführung der Hauptversuche modifiziert und verwendet werden.

Maschinenbeschreibung

Der Aufbau und die Entwicklung der Reibauftragslötanlage (kurz: RALö Anlage) kann in der Dissertation von Nguyen [12, S. 41 - 49] nachvollzogen werden. Die Werkzeugmaschine ist zum Reibbeschichten massiver Wellen ausgelegt. In Tabelle 6 sind die Leistungsdaten der Anlage aufgeführt. Die Anlage ist in Phase 2 der Projektunterteilung (s. Abbildung 9) verwendet worden. Sie wurde vor Ort bei der Firma SITEC Industrietechnologie GmbH mit einer auf die Anlage angepassten Konstruktionsvariante des Schleifkontakts von Anlage 1 versehen (s. Abschnitt 4.1).

Tabelle 6: Leistungskennwerte der eingesetzten Anlage 2

RALö – Anlage der Firma SITEC Industrietechnologie GmbH		
Anpresskraft	0,5 - 16	kN
Bolzendrehzahl	680 – 2800	$\frac{1}{min}$
Wellendrehzahl	0,2 – 130	$\frac{1}{min}$

Die Probengeometrie auf der RALö Anlage sind Wellen, somit wurde zusätzlich eine Wellenkontaktierung installiert.

Erkenntnisgewinn

Dies massive Auslegung bedingt, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, ein langsames Regelverhalten, welches zum Hybrid-Reibbeschichten hinderlich ist. Im Vergleich mit Reibbeschichten tritt die Erwärmung beim Hybrid-Reibbeschichten schnell ein. An der Anlage konnte nachgewiesen werden, dass die durch die Hybridisierung eingebrachte Wärme ausreichend zum Reibbeschichten ist und auch das Beschichten von Wellen mit diesem Verfahren möglich ist.

Eine weitere Nutzung der Beschichtungsanlage 2 war wegen des langsamen Regelverhaltens nicht zielführend

4.3 Beschichtungsanlage 3 - Vertikale Fräsmaschine

Zielstellung

Zur Durchführung der hauptsächlich ausgewerteten Versuche wurde eine vertikale Fräsmaschine aus dem Werkstattumfeld der TU Dresden umgerüstet. Diese Werkzeugmaschine wurde zum Hybrid-Reibbeschichten der ausgewerteten und verlöteten Proben eingesetzt.

Maschinenbeschreibung

Die für die Versuche relevanten Leistungsdaten der Fräsmaschine sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Abbildung 12 zeigt den für die Versuche verwendeten Aufbau. Die Fräsmaschine wurde mit einer pneumatischen, kraftgesteuerten Hebevorrichtung als Probenaufnahme, einer Vorrichtung zur Aufnahme des Verbrauchsmaterials sowie Messtechnik versehen. Im Folgenden werden die eingesetzten Komponenten beschrieben.

Tabelle 7: Leistungskennwerte der eingesetzten Fräsmaschine 2

Vertikale Fräsmaschine der Firma VEB Werkzeugmaschinenkombinat „Fritz Heckert“

Leistung	8	kW
Vorschub	stufenweise max. 800	$\frac{mm}{min}$
Drehzahl	stufenweise max. 1400	$\frac{1}{min}$
Kopfschwenkung	± 30	$^{\circ}$

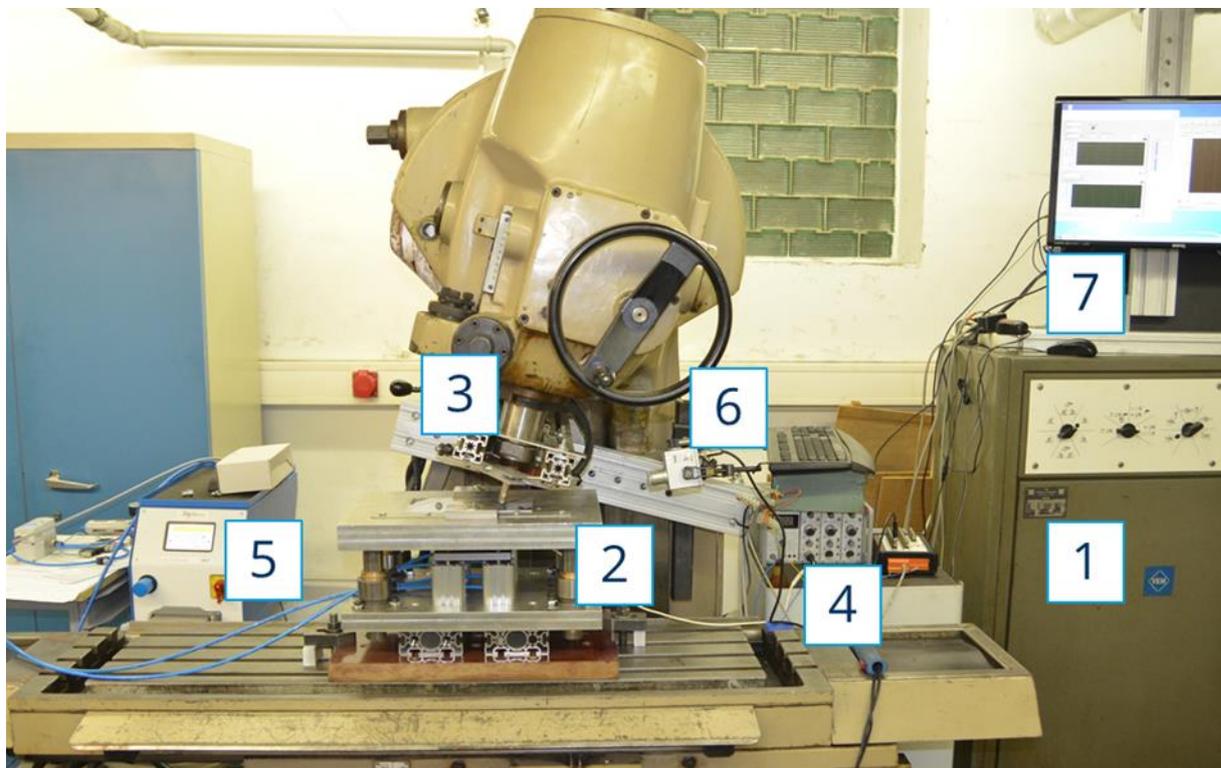


Abbildung 12: Vertikale Fräsmaschine (Anlage 3 – Phase 4) mit Vorrichtung und Messtechnik

- Markierung 1 in Abbildung 12: Stromquelle und Steuerung der Fräsmaschine
- Markierung 2 in Abbildung 12: Pneumatische, kraftgesteuerte Probenaufnahme
Die Probenaufnahme ist in Abbildung 13 detailliert dargestellt. Sie besteht aus einem vier-Säulen-Gestell (s. Abbildung 13 – 1), welches mit vier pneumatischen Zylindern (s. Abbildung 13 – 2) in Verbindung mit einer Kraftmessdose die Blechprobe mit definierter Kraft gegen das Verbrauchsmaterial presst. Die

Blechprobe wird mit zwei Spannelementen auf der Grundplatte des vier-Säulen-Gestells verspannt (s. Abbildung 13 – 3). Ebenfalls an dieser Platte ist ein Pol der Stromquelle montiert. Der gesamte Aufbau ist zur Isolation der Fräsmaschine auf einer Hartpapierplatte, welche auf dem Werkstücktisch der Fräsmaschine montiert ist, befestigt.

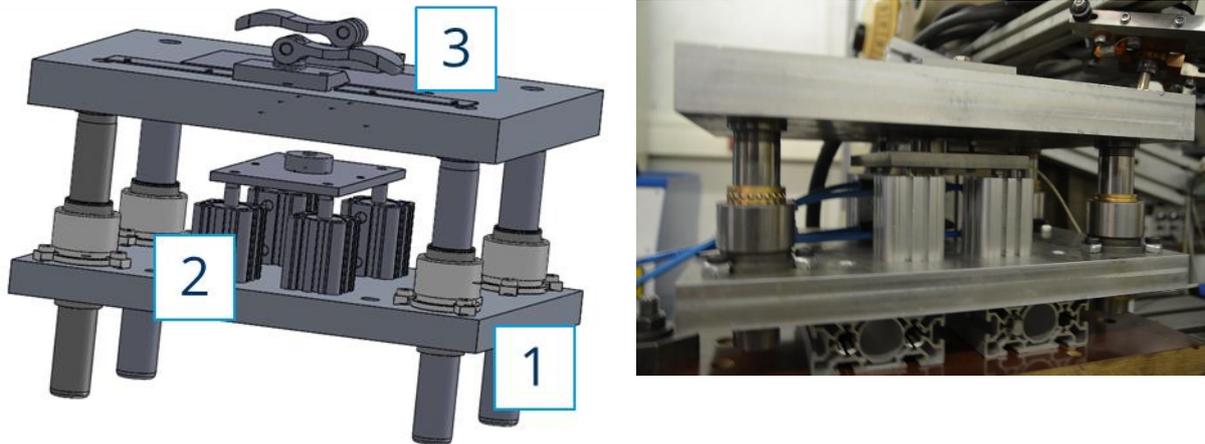


Abbildung 13: Pneumatisch, kraftgesteuerte Probenaufnahme

- Markierung 3 in Abbildung 12: Einspannung des Verbrauchmaterials inkl. Schleifkontakt (s. Abbildung 14)

Die Verbrauchsmaterialaufnahme besteht aus einer Kupferwelle mit Stirnbohrung (s. Abbildung 14 – 1). Das Ende, welches in der Spannzange aufgenommen wird, ist mit einer Kunststoffhülse isoliert, so dass kein Fehlstrom über die Anlage fließen kann. Die Welle ist aus CuCr1Zr. Die Schleifbacken (s. Abbildung 14 – 2) sind aus Cu-ETP gefertigt und in Aluminiumklemmen montiert. Diese Klemmen werden mit zwei Gewindestäben (s. Abbildung 14 – 3), Muttern und Federn auf die Kupferwelle gespannt. Die Kontaktierung erfolgt an den Kupferbacken. Der Lotbolzen wird mit Hilfe eines Ringspannelements (Trantorque Mini Metric, Größe 12x23 und 10x23) in der Stirnbohrung gespannt. Der Schleifkontakt zeigte im geschmierten Zustand erwartungsgemäß bessere Laufeigenschaften, was sich in einer geringeren Erosion der Schleifkontaktflächen zeigte. Auch die Stromleitungseigenschaften verbesserten sich durch die Schmierung. Im Vergleich mit dem ungeschmierten Zustand entstanden keine Lichtbögen während dem Prozess mehr, was den Verschleiß der Laufflächen verringerte. Als geeignet wegen ausreichender Wärmebeständigkeit hat sich Schneidöl herausgestellt.

- Markierung 4 in Abbildung 12: Messkarte und Messverstärker zur Datenerfassung und Steuerung

Als Messkarte wird eine Goldammer MultiChoice USB basic [27] eingesetzt. Die Messkarte dokumentierte die axiale Kraft, die Drehzahl und die Vorschubgeschwindigkeit und steuert das Magnetventil der Pneumatik der Probenaufnahme. Der Messverstärker ist ein Eigenbau. Zur Messung der axialen Kraft ist eine Kraftmessdose eingesetzt worden. Die Drehzahl wurde durch eine Markierung an der Spindel mit einem Lichtsensor gemessen und der Vorschub des Werkstücktisches mit einem Potentiometer.

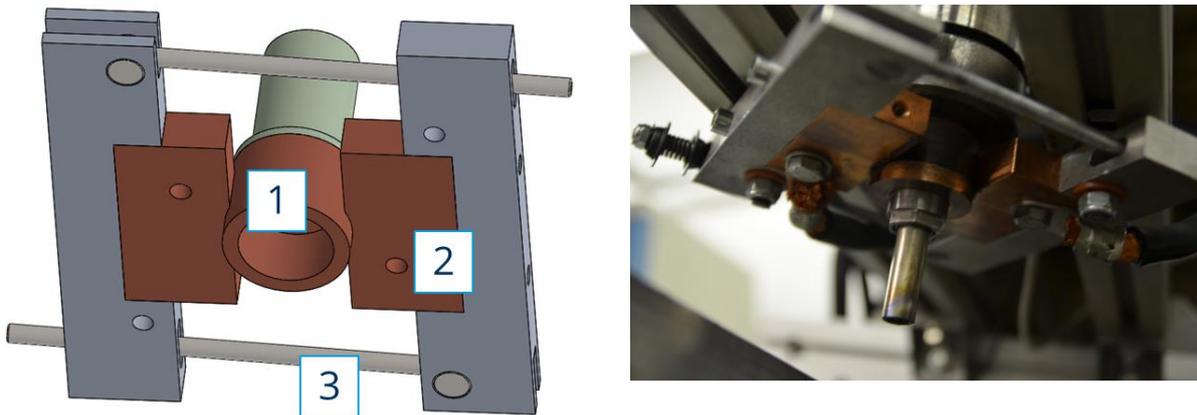


Abbildung 14: Schleifkontakt und Verbrauchsmaterialeinspannung

- Markierung 5 in Abbildung 12: Stromquelle HyMicro zur Widerstandserwärmung
Die Stromquelle zur Widerstandserwärmung ist eine mobile Punktschweißstromquelle der Firma Alia Technik GmbH. Der normale Anwendungsfall dieser Maschine ist das Mikropunktschweißen. Sie liefert Stromstärke zwischen 0,05 – 4 kA bei einer maximalen Spannung von 10 V. Zudem kann der gewünschte Stromverlauf eingestellt werden.
- Markierung 6 in Abbildung 12: Pyrometer zur Temperaturmessung:
Zur berührungslosen Temperaturmessung ist das digitale Infrarotpyrometer Serie KTRD 4075 der Firma Dr. Georg Maurer GmbH im Einsatz. Dieses Pyrometer deckt unter anderem einen Temperaturbereich von 300 – 1300 °C ab.
Die Temperatur am Bolzen-Substrat-Interface wird als wichtigste Messung im Versuchsaufbau angesehen. Anhand dieser Messung ist nach Meinung der Autoren der Prozess regelbar.
- Markierung 7 in Abbildung 12: Messrechner:
Das Messen erfolgte durch Programmierung eines Messprogramms mit LabView.

Erkenntnisgewinn

Mit diesem Versuchsaufbau sind die in Abschnitt 5.3 diskutierten Beschichtungen hergestellt worden. Für die industrielle Umsetzung sollte in jedem Fall ausreichend Bauraum für einen Schleifkontakt nach industriellen Standards vorgesehen werden. Der

Schleifkontakt sollte derart ausgelegt werden, dass keine Reibungswärme durch ihn an den Reibbolzen abgeben wird. Dazu ist eine Kühlung zu integrieren. Mit guter Auslegung könnte der Schleifkontakt somit sogar als Bolzenkühlung dienen und zur Einhaltung des in Abschnitt vorgestellten Prozessschemas (s. Abbildung 6) eingesetzt werden. Zur industriellen Umsetzung sollte zudem eine Anlage zur Verwendung verschiedener Lotbolzendurchmesser mit stufenloser Drehzahlregelung und zur Anpassung an unterschiedliche Bauteile und Geometrien mit einer freien Bahneinstellung ausgestattet sein. Zudem ist eine fortlaufende Bolzenzuführung ähnlich einer Schweißdrahtzuführung zu entwickeln, so dass Bauteile ohne Bolzenwechsel vollständig bearbeitet werden können.

4.4 Industrie-Vakuumofen Typ Tesla PZ 810

Zur Durchführung von Vakuumlötprozessen mit Stahl und Nichteisenmetallen mit einer Löttemperatur bis zu 1300 °C besitzt die TU Dresden einen Vakuumofen Typ Tesla PZ 810 (s. Abbildung 15).



Abbildung 15: Industrie-Vakuumofen Typ Tesla PZ 810

Der Ofen ist ausgestattet mit einer Leybold Vakuumpumpe und erzeugt ein Hochvakuum bis zu 10^{-6} mbar. Das Rezipientenvolumen hat die Maße \varnothing 350 mm auf einer Höhe von 500 mm.

4.5 Konduktivprüfstand

Der Konduktivprüfstand ist ein Versuchsstand zur Dokumentation der Benetzung während des Lötprozesses. Abbildung 16 zeigt seinen Aufbau.

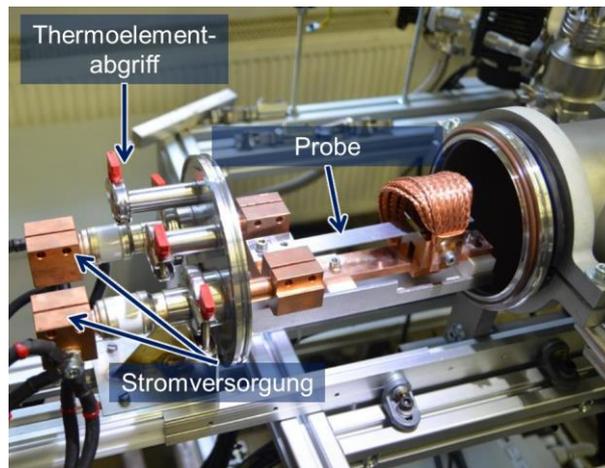


Abbildung 16: Aufbau des Konduktivprüfstands

Der Versuchsstand heizt durch konduktive Erwärmung eine Probe geregelt auf Löttemperatur. Die Probe ist zur Ausnutzung des Stoffwiderstands scherzugprobenartig geformt. Der Rezipient kann mit Luft, Schutzgas und Vakuum betrieben werden. Während dem Versuch erfolgt eine Videoaufzeichnung der Benetzung sowie die Aufzeichnung der Messdaten der Temperatur und des Drucks. Mit einem nachfolgenden Prozessschritt können diese Daten der Videoaufnahme zeitgenau zugeordnet werden. Der Versuchsstand ermöglicht somit einen aussagekräftigen Vergleich des Benetzungsverhaltens verschiedener Lote und Lotapplikationen.

4.6 Chromatisch-konfokale Mikroskopie zur Oberflächentopographiemessung

Ein Konfokal-Mikroskop ist eine spezielle Form eines Lichtmikroskops. Übliche Lichtmikroskope ermöglichen durch eine mehrstufig vergrößerte Abbildung eine detaillierte Betrachtung des Objekts. Ähnlich wie bei einem Fotoapparat entspricht das Abbild einer Überlagerung von Punkten innerhalb und außerhalb der Fokalebene (Fokalebene), welche vom Detektor, beispielsweise dem menschlichen Auge, nicht unterschieden werden können oder noch als scharf empfunden werden. Die konfokale Mikroskopie reduziert diese Unschärfe deutlich und ermöglicht somit eine detaillierte Auswertung des Objekts auch in axialer Richtung. Aus diesem Grund eignet sich die konfokale Mikroskopie besonders für flächenhafte Rauheitsmessungen und Abbildung von 3D-Mikrogeometrien.

In Abbildung 17 werden die Messprinzipien der konfokalen Mikroskopie gezeigt. Eine Lochblende (Pinhole) mit einem Durchmesser von wenigen Mikrometern wird von einer Weißlichtquelle beleuchtet (s. Abbildung 17 links, Markierung 1). Daraus entsteht eine

Punktlichtquelle, welche durch entsprechende Objektive und Strahlleiter auf der Oberfläche des Werkstücks abgebildet wird. Die Lage des Werkstücks in Richtung der optischen Achse bestimmt die Schärfe, mit der die Punktlichtquelle als Lichtscheibe mit unterschiedlichem Durchmesser auf dem Werkstück abgebildet wird. Das von diesem beleuchteten Werkstückpunkt ausgehende Licht (Fluoreszenzlicht, reflektiertes Licht) wird über die gleiche Optik und Strahlteiler auf eine Lochblende vor dem Sensor abgebildet. Bei Abbildung 17 links, Markierung 2, befindet sich die Werkstückoberfläche exakt in der Fokalebene, so dass sich ein scharfer Lichtpunkt auf der Blende abbildet. Ist die Werkstückoberfläche, wie bei Markierung 3, außerhalb der Fokalebene sinkt die Intensität des reflektierten Lichts dementsprechend am Sensor ab. Einen speziellen Anwendungsfall der konfokalen Mikroskopie stellt die Verwendung eines konfokal-chromatischen Sensors dar, bei dem die Entfernung nicht über die Intensität des reflektierten Lichts, sondern über die Wellenlänge bewertet wird.

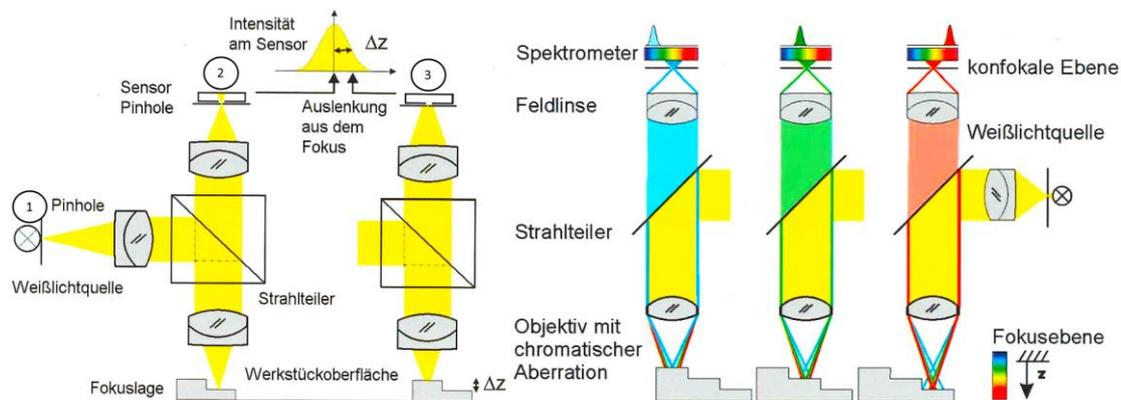


Abbildung 17: Konfokale Mikroskopie (links) und chromatisch-konfokale Mikroskopie (rechts) - Funktionsprinzip [28, S. 31 ff.]

5 Versuchsergebnisse und Diskussion

Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt anhand der Projektunterteilung (s. Abbildung 9). Die Ergebnisse der einzelnen Phasen führen zu der nächsten Phase.

5.1 Phase 1 – Organisation der Anlage und des Materials, Konzept- und Konstruktionsvalidierung

Die Bereitstellung des Versuchsmaterials erfolgte nach Absprache durch die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses. Die Bereitstellung der Anlage verzögerte sich zu Projektbeginn zunächst durch Auslastung bei der bereitstellenden Firma SITEC Industrietechnologie GmbH. Die Vorbereitung bezüglich notwendiger Betriebsmittel (Hydraulik-Aggregat, Kühlung) an der TU Dresden erfolgte parallel zu den Bestrebungen die Werkzeugmaschine (Beschichtungsanlage 2, Abschnitt 4.2) zu erhalten.

Während der Versuche scheiterte die Übergabe der industriellen Reibauftragslötanlage zunächst an Auslastung bei der Firma SITEC und im Anschluss an den gestellten Nutzungsbedingungen, welche von der TU Dresden nicht angenommen worden sind. Weiterführende Versuche erfolgten daher in Phase 2 (s. Abschnitt 5.2) vor Ort bei SITEC Industrietechnologie GmbH.

Zielstellung

Der konstruierte und aufgebaute Schleifkontakt soll vor Einsatz in Beschichtungsanlage 2 auf Funktion geprüft werden.

Versuchsdurchführung und Diskussion

Zur Überprüfung der Schleifkontaktkonstruktion ist an der TU Dresden eine eigene Fräsmaschine, Beschichtungsanlage 1 (s. Abschnitt 4.1), umgerüstet und in Betrieb genommen worden. Die Notwendigkeit einer Konstruktion des Schleifkontakt ergab sich aus der Tatsache, dass Schleifkohlenhersteller in Fachgesprächen zur Übertragung von Stromstärken über 1 kA wenig Erfahrungen aufwiesen und deutlich größere Kontaktierungsflächen aufriefen, als der Bauraum der angestrebten SITEC Anlage zur Verfügung stellen konnte [26]. Zur Funktionsprüfung wurde mit einem Passstift ein 3mm starkes Blech aus S235 kontaktiert und quasi zerspanend bearbeitet. Das Aufbringen einer Beschichtung war nicht das Ziel dieser Versuche. Während dieser Bearbeitung wurde Strom mit bis zu 2kA über den Schleifkontakt geleitet. Der Einfluss des Stroms ist in den Abbildung 18 und Abbildung 19 ersichtlich. Mit den roten Markierungen sind die Stromimpulse während dem Prozess markiert.

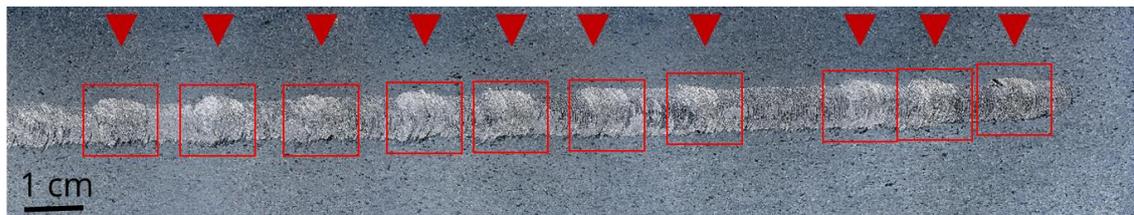


Abbildung 18: Stromübertragung mit Schleifkontakt über Passstift auf Substrat ($I = 1\text{ kA}$; $t_s = 1\text{ s}$)

Ähnlich dem stromunterstützten Rührreibschweißen (s. Abbildung 7) ist der Eingriff des Passstifts in das S235 stärker ausgeprägt. Die Funktionalität des Schleifkontakts wird daraus positiv abgeleitet.

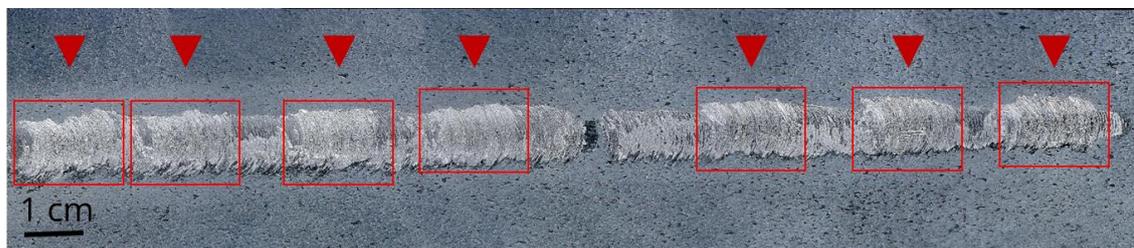


Abbildung 19: Stromübertragung mit Schleifkontakt über Passstift auf Substrat ($I = 1\text{ kA}$; $t_s = 3\text{ s}$)

Zusätzlich zu dem Nachweis bestätigt die Stromquelle durch ein Ampelsignal, ob die gewählten Parameter eingesetzt werden konnten. Dieses Signal war positiv (grün).

Erkenntnisgewinn Phase 1

Mit einem Schleifkontakt aus Kupfer auf Kupfer können Stromstärken bis zu 4 kA über den Reibbolzen auf das Substrat geleitet werden. Dies entspricht der maximalen Stromstärke der eingesetzten Stromquelle. Laut dem Fachgespräch mit Schleifkohleherstellern [26] hat der entwickelte Schleifkontakt einen kleineren Bauraum als ein entsprechender Schleifkontakt mit Schleifkohlen. Der Einsatz des entworfenen Schleifkontakts für die weitere Bearbeitung des Projektes ist zielführend.

5.2 Phase 2 – Konstruktive Adaption d. Schleifkontakts, Inbetriebnahme und Versuche bei SITEC Industrietechnologie GmbH

Modifizierung der Beschichtungsanlage 2 (s. Abschnitt 4.2) mit den zum Hybrid-Reibbeschichten notwendigen Elementen (Isolationselemente, Schleifkontakt, Wellenkontakt, Kühlung). Adaption der Erkenntnisse aus Phase 1 (s. Abschnitt 5.1) auf

die Beschichtungsanlage 2 (s. Abschnitt 4.2). Versuchsplanung, -vorbereitung und Durchführung.

Zielstellung und Planung

Nach Adaption der Erfahrungen aus Phase 1 und Integration des Schleifkontakts in die Anlage zielten die ersten Versuche auf die Darstellung des IST-Zustands ab. Dazu waren 5 Versuche geplant, welche sich an den Parametern von Nguyen [12] orientierten (s. Tabelle 8). Die Ergebnisse werden mit dem Stand aus der Dissertation von Nguyen [12] verglichen, um darauf aufbauend erste Hybrid-Reibbeschichtungen zu realisieren. Weiterführend sollen neue Substratwerkzeuge (FeCr) sowie neue Reibbolzenwerkstoffe (Ni) stichprobenartig eingesetzt werden. Hierfür sind ebenfalls 5 Versuche geplant worden, welche sich mit den Parametern an Nguyen orientieren. Die Parameter sind in Tabelle 10 aufgeführt. Durch die Hybridisierung der Anlage soll zudem die notwendige axiale Kraft reduziert werden. Hierzu wurden Versuche vorbereitet, bei welchen die Kraft konstant auf 400 N gehalten wird und intuitiv nach einer Ergebniskontrolle die Parameter Drehzahl und Stromstärke für den nächsten Versuch angepasst werden bis ebenfalls mit Nguyen [12] vergleichbare Ergebnisse produziert werden.

Versuchsdurchführung und Diskussion

Nguyen hat seine Versuche auf Wellen mit $\varnothing 50$ mm mit Beschichtungsbolzen mit $\varnothing 10$ mm durchgeführt. In seiner Dissertation kategorisiert er verschiedene Parametersätze mit Kupfer (CW004A) auf C45 Wellen [12, S. 207]. In Tabelle 8 sind die für die vergleichenden Versuche verwendeten Parameter ausgewiesen. Zeile 1 von Tabelle 8 weist mit der Versuchsbezeichnung „Cu“ die Parameter der Hauptversuche von Nguyen aus. Die folgenden Parameterzeilen mit den Versuchsbezeichnungen „a – g“ wurden gewählt, um ein optisch vergleichbares Ergebnis zu erzeugen.

Tabelle 8: Versuchsparameter - vergleichenden Versuche

Bezeichnung	Bolzendrehzahl n_B /U/min	Kraft F /kN	Wellendrehzahl n_W /U/min	Haltezeit t_s /s
Cu	2400	1,6	24	4
a, b, c, d, e	2400	1,6	24	4
f	2400	1,8	24	4
g	2400	2	24	4

Das Ergebnis von Nguyen ist in Abbildung 20a gezeigt. Unter b sind die Ergebnisse der eigenen Versuche mit den angegebenen Parametersätzen gezeigt. Es sind deutliche Unterschiede zwischen dem Ergebnis von Nguyen und den Ergebnissen der

durchgeführten Versuche zu erkennen. Die Versuche unterschieden sich neben der in Tabelle 8 notierten Kraft in den in Tabelle 9 aufgeführten Umständen. Bei Durchführung der Versuche wurden diese Abweichungen als marginal eingeschätzt. Die Ergebnisse widerlegen diese Einschätzung.

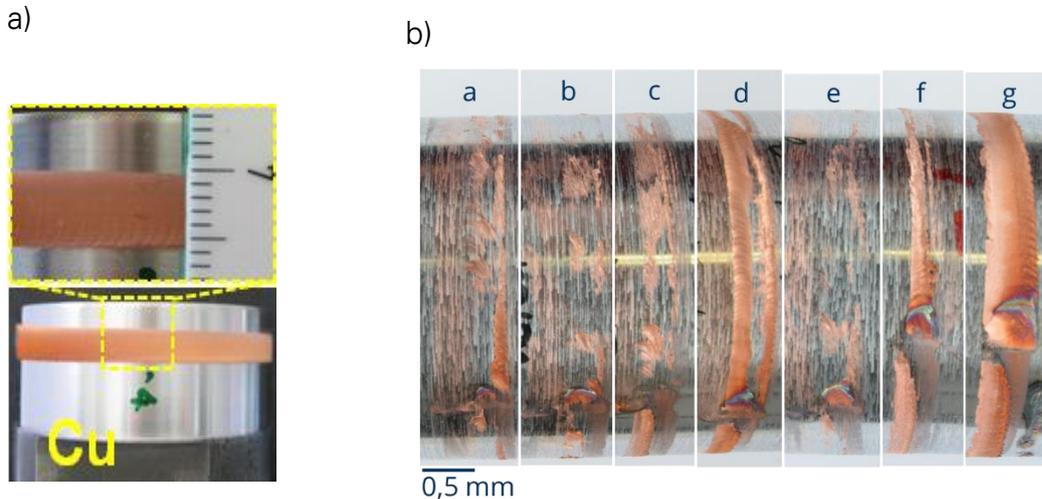


Abbildung 20: IST-Zustand – Vergleich der Versuchsergebnisse

Alle vergleichenden Versuche unterscheiden sich im Wellendurchmesser um 5 mm sowie im Bolzenwerkstoff. CW004A ist ein elektrolytisch raffiniertes, sauerstoffhaltiges Kupfer, CW008A wird sauerstofffrei hergestellt. Beide Werkstoffe werden in der Elektrotechnik und Elektronik eingesetzt. Die Versuche b, c, d, e, f wurden mit einem Bolzendurchmesser Ø12 mm durchgeführt und ab Versuch c sind der Schleifkontakt und alle Umrüstungen angelegt gewesen.

Tabelle 9: Abweichung der Versuchsproben zwischen den Versuchen von Nguyen und den Vergleichsversuchen

Bezeichnung	Bolzen- werkstoff	Wellen- werkstoff	Bolzen Ø /mm	Wellen- Ø /mm	Anlagenaufbau
Cu	CW004A	C45	Ø10	Ø50	-
a	CW008A	C45	Ø10	Ø45	-
b	CW008A	C45	Ø12	Ø45	-
c, d, e, f, g	CW008A	C45	Ø12	Ø45	Komponenten des Schleifkontakts angelegt

Die Notwendigkeit der Krafterhöhung bei Vergrößerung des Bolzendurchmessers oder des Wellendurchmessers ist bedingt durch die Veränderung der Flächenpressung

nachvollziehbar. Der Umstand, dass Versuch a (s. Tabelle 8, Tabelle 9), in welchem der Wellendurchmesser verkleinert wurde, der Reibbolzendurchmesser jedoch einen Durchmesser von $\varnothing 10$ mm beibehielt, zu keiner vergleichbaren Beschichtung führte, ist damit nicht begründbar. Im Fachgespräch [29] stellt sich ein weiterer für den Versuchsstand wichtiger Parameter, die Exzentrizität, heraus. Die Exzentrizität beschreibt die Auslenkung der Mittelachsen von Reibbolzen und Welle und ist in Abbildung 21 verbildlicht. Für die Versuche von Nguyen war die Exzentrizität auf $e = 0,2$ mm eingestellt. Dieser Parameter verändert sich mit Variation der Durchmesser von Welle oder Bolzen nicht, die Quintessenz des Fachgesprächs ist dennoch, dass bei Veränderung der Durchmesser nicht die Anpassung der Flächenpressung durch Einstellen der Kraft, sondern durch Einstellen der Auflagefläche durch die Exzentrizität den besseren Ansatz darstellt.

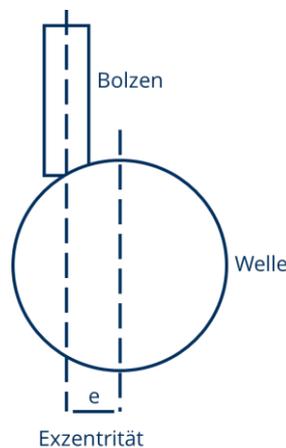


Abbildung 21: Exzentrizität zwischen Bolzen und Welle

Diese Aussage ist nicht weiter überprüft worden, da das Einstellen der Exzentrizität an der Anlage nicht über eine verstellbare Achse ermöglicht wird, sondern durch vollständiges Versetzen der Wellenaufnahmeeinheit. SITEC Industrietechnologie GmbH forderte, dass bei Veränderung der Ursprungszustand wiederherstellbar bleibt, was bei Verstellen der Exzentrizität nicht möglich gewesen wäre. Daher gilt das Ergebnis von Versuch g (s. Tabelle 8 und Abbildung 20) als Reproduktion der Ergebnisse von Nguyen.

Stichprobenversuche mit Kupferbolzen auf FeCr Stahl führt zu keinem positiven Ergebnis. Die Parameter sind angelehnt an die o.g. vergleichenden Untersuchungen gewählt worden und Tabelle 10 aufgeführt.

Weiterführende Untersuchungen beschäftigten sich mit der Reduzierung der notwendigen axialen Kraft, dem Einsatz der Widerstandserwärmung und der Erweiterung der Werkstoffmatrix mit reinem Nickel als Bolzen.

Tabelle 10: Versuchsparameter – Grundwerkstoffweiterung FeCr Stahl

Bezeichnung	Bolzendrehzahl n_B /U/min	Kraft F /kN	Wellendrehzahl n_W /U/min	Haltezeit t_s /s
1	2400	2	24	4
2	2400	2,1	16	4
3, 4	2600	2,4	16	4
5	2600	2,6	24	4

Zur Beschichtung von Rohren und dünnwandigen Geometrien muss die axiale Kraft auf unter 500 N reduziert werden, da, wie die Simulation in Abbildung 22 zeigt, bei einem niedrig legierten Stahlrohr mit Durchmesser 50x1,5 mm ab 500 N die Streckgrenze überschritten wird und es zu Verformungen kommt.

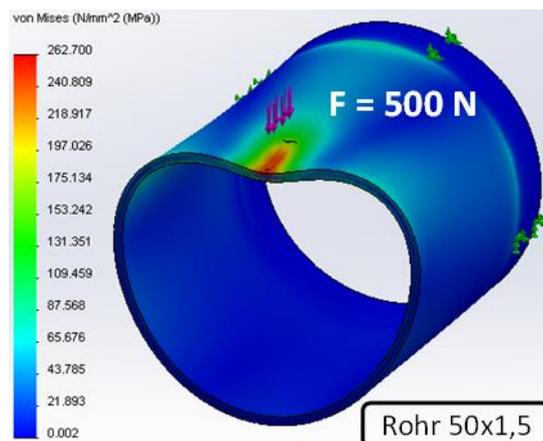


Abbildung 22: Verformung eines dünnwandigen Rohres bei 500 N axialer Kraft

Daher wurde bei Versuchen mit Wirkenergieüberlagerung (Reibungswärme, Widerstandserwärmung) die axiale Kraft auf 400 N eingestellt. Die Stromstärke wurde auf 1,5 kA festgelegt und manuell im Prozess zugeschaltet.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 23 dargestellt. Im Vergleich mit den vorhergehenden Versuchen entsprechen die Ergebnisse denen von Abbildung 20 a, b, c, e und f. Die zugeführte Energie war nicht ausreichend für einen durchgängigen Auftrag, dennoch sind erste Kupferrückstände erkennbar.

Ähnliche Versuche sind mit Nickelbolzen auf C45 Wellen durchgeführt worden. Die Parameter sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 11: Versuchsparameter – Erste Versuche zur Wirkenergieüberlagerung mit Kupfer

Bezeichnung	Bolzendrehzahl n_B /U/min	Kraft F /kN	Wellendrehzahl n_W /U/min	Haltezeit t_s /s	Stromstärke I /kA
h	2400	0,4	24	4	1,5
i	1000	0,4	24	4	1,5

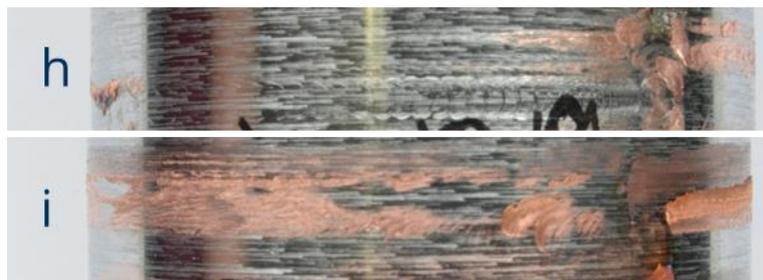


Abbildung 23: Versuche mit Wirkenergieüberlagerung mit Kupfer auf C45

Die Ergebnisse sind in Abbildung 24 dargestellt. Auch hier sind die Ergebnisse nicht positiv. Der Nickelbolzen hat das Substrat abrasiv bearbeitet. Im Versuch j ist die lokale Erwärmung des Substrats anhand der Oxidfarben erkennbar.

Tabelle 12: Versuchsparameter – Erste Versuche zur Wirkenergieüberlagerung mit Nickel

Bezeichnung	Bolzendrehzahl n_B /U/min	Kraft F /kN	Wellendrehzahl n_W /U/min	Haltezeit t_s /s	Stromstärke I /kA
j	2400	0,4	24	4	1,5
k	1000	0,4	24	4	1,5

Bei den Versuchen mit beiden Werkstoffen entstanden sowohl zwischen Bolzen und Welle als auch im Schleifkontakt plötzliche Lichtbögen. Die Lichtbögen im Schleifkontakt werden mit den Vibrationen der Anlage begründet und führten dazu, dass nach diesen vier Versuchen die Gleitflächen verschlissen waren und zur Überarbeitung zur TU Dresden zurückgenommen werden mussten. Bei einer ersten oberflächlichen Auswertung der Messdaten der Versuche aus Tabelle 11 stellte sich heraus, dass die Anlage 400 N nicht regeln kann. Ein Fachgespräch mit Nguyen ergab, dass 700 N die

untere Regelgrenze darstellen, weshalb die Versuche mit 700 N wiederholt wurden. Die Ergebnisse entsprachen den o. g. Ergebnissen.

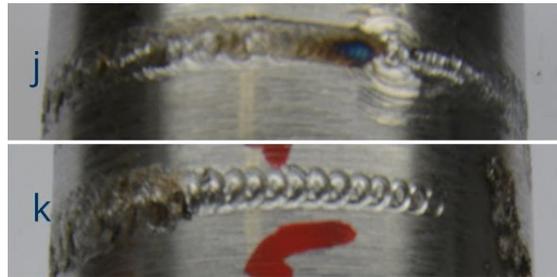


Abbildung 24: Versuche mit Wirkenergieüberlagerung mit Nickel auf C45

Weiterführende Datenauswertung zeigt die Möglichkeiten der Wirkenergieüberlagerung sowie die unzureichende Regelung der Maschine. Bei den durchgeführten Versuchen wurden die Temperatur am Bolzen-Welle-Interface, die axiale Kraft, die Bolzendrehzahl und der Drehwinkel der Welle aufgezeichnet. Die Auswertung dieser Daten wird im Folgenden dargestellt.

Abbildung 25 zeigt die Temperaturmessdaten des Versuchs g (s. Tabelle 8). In blau sind die Temperaturdaten, in grau die Drehwinkeldaten gezeigt. Mit den horizontalen Markierungen sind verschiedene Prozessschritte charakterisiert:

- K: Kontakt Bolzen – Welle hergestellt; Axiale Kraft wird aufgebaut
- T: Temperatur messbar – 100 °C überschritten
- D: Drehwinkel ändert sich – Wellendrehung setzt ein

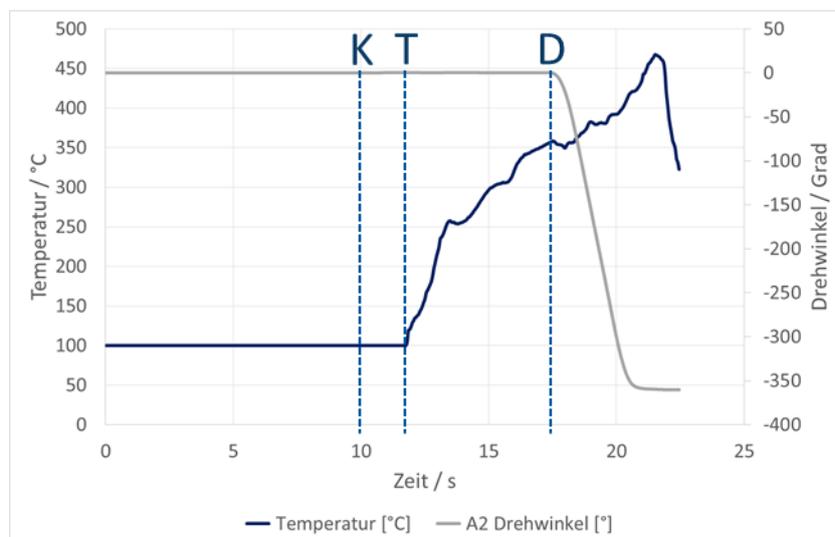


Abbildung 25: Temperatur – Versuch g (2 kN, 2400 U/min, 24 U/min)

Die Entwicklung der Temperatur zeigt, dass sich während dem Prozess keine einheitliche Temperatur einstellt, aber eine Temperatur zwischen 350 °C bis 500 °C für eine erfolgreiche Beschichtung mit Kupfer notwendig ist. Nguyen zeigt in seiner Dissertation keine Messdaten seiner Anlage, beziffert jedoch für die erfolgreiche Beschichtung mit Kupfer eine Temperatur von 400°C [12, S. 91, Z. 6].

Abbildung 26 zeigt die axialen Kraftmessdaten desselben Versuchs g (s. Tabelle 8). Auffällig im Kraftverlauf sind zwischen den Markierungen T und D die Überschwinger bis zu 3 kN beim Einstellen der Regelgröße. Während dem eigentlichen Beschichtungsprozess bleibt die Kraft nicht konstant, sondern schwingt zwischen 1,8 kN bis 2,2 kN. In der axialen Kraftregelung treten somit in einem Prozess ohne Wirkenergieüberlagerung Regelabweichungen von bis zu 50% auf.

Die Bolzendrehzahl über Versuch g ist in Abbildung 27 gezeigt. Hier ist eine Schwankung der Drehzahl um bis zu 10% zu verzeichnen. Das Einsetzen der Schwankung ist passend zur Erwärmung des Bolzens. Während des Beschichtungsprozesses ist die Drehzahl bis zu 300 U/min unterhalb der eingestellten Größe. Zum Ende des Prozesses erfolgt ein plötzlicher Anstieg der Drehzahl.

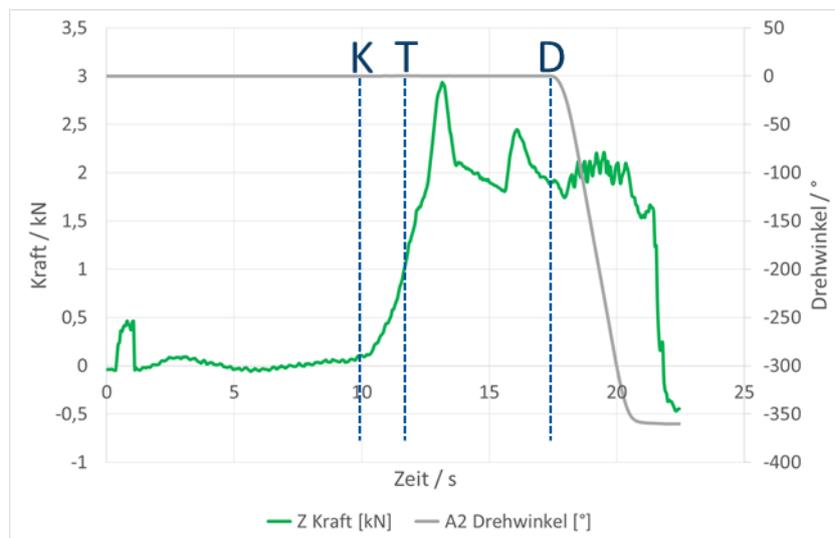


Abbildung 26: Axiale Kraft – Versuch g (2 kN, 2400 U/min, 24 U/min)

Kraft und Drehzahl schwanken nach den Diagrammen beide im Moment des Beginns der Wellendrehzahl. Diese Schwankungen lassen sich auf die Antriebsform der Anlage zurückführen. Alle Antriebe werden von demselben Hydraulikaggregat bedient. Setzt ein weiterer Abnehmer, wie z. B. die Wellendrehung, im Prozess ein, verlieren die bereits aktiven Abnehmer kurzzeitig an Leistung. Das Regeln erfolgt durch einen PID-Regler,

welcher nicht ausreichend gut eingestellt ist. Dies macht sich auch in den Messdaten mit Wirkenergieüberlagerung bemerkbar.

Im Vergleich mit den Messdaten aus den Versuchen ohne Hybridisierung liefern die Daten mit Hybridisierung ableitbare Ergebnisse. Abbildung 28 zeigt die Temperaturmessdaten von Versuch h (s. Tabelle 11) mit einer Stromstärke 1,5 kA. Neben den schon erläuterten Markierungen sind Pfeilmarkierungen hinzugekommen, die den Einsatzzeitpunkt des Stromimpulses anzeigen. In den Versuchen h und i ist eine Stromzeit impulsartig ausgefallen, da bei einsetzenden Lichtbogen der Stromfluss manuell unterbrochen wurde. Zum Zeitpunkt der Temperaturspitzen ist demnach die Energiezufuhr unterbrochen worden. Der steile Temperaturabfall ist ein Resultat davon. Mit dem Erreichen von ca. 350 °C, sind dennoch vergleichbare Temperaturen, wie bei den Versuchen ohne Wirkenergieüberlagerung erzielt worden. Die Konzeptidee des Ersetzens der Reibwärme durch Widerstandserwärmung zur notwendigen Kraftreduzierung ist somit bestätigt.

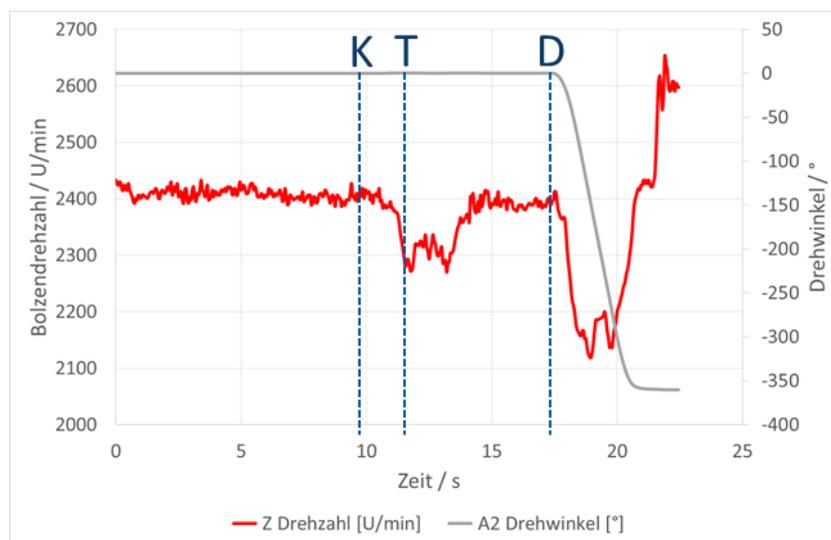


Abbildung 27: Bolzendrehzahl – Versuch g (2 kN, 2400 U/min, 24 U/min)

Auch für die Versuche mit Nickel kann diese Aussage bekräftigt werden. Im Anhang – Phase 2 sind die Diagramme aufgeführt.

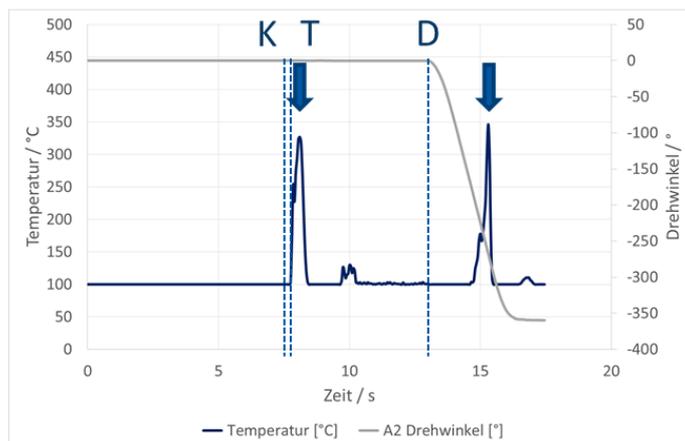


Abbildung 28: Temperatur – Versuch h (0,4 kN, 2400 U/min, 24 U/min, 1,5 kA)

In Abbildung 29 ist die Kraftmessung von Versuch h (s. Tabelle 11) aufgeführt. Ähnlich Versuch g (s. Abbildung 26) übersteuert die Regelung, für die Versuche mit reduzierter Kraft jedoch nicht um bis zu 50 %, sondern um bis zu 100 % und mehr, mit einer Maximalkraft von 1 kN. Zudem ist auffällig, dass gleichzeitig mit dem Stromimpuls ein abrupter Krafteinbruch bis auf 0 kN einhergeht. Bolzen und Welle hatten somit keinen Kontakt mehr. Im Anschluss an diesen Einbruch tritt wieder ein Überschreiten der eingestellten Kraft von 0,4 kN um 0,6 kN auf 1 kN ein. Für Kupfer wird die zur Beschichtung notwendige Temperatur erreicht, es tritt also eine Plastifizierung und somit ein Festigkeitsverlust ein. Im Vergleich zu den Versuchen ohne Wirkenergieüberlagerung tritt die Erwärmung sprunghaft ein.

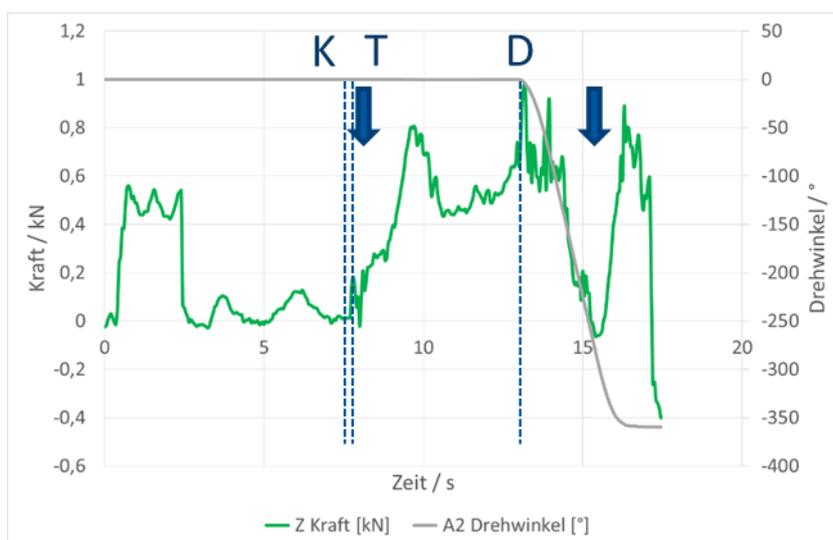


Abbildung 29: Axiale Kraft – Versuch h (0,4 kN, 2400 U/min, 24 U/min, 1,5 kA)

Da die Anlage wegen ihrer PID-Regler-Einstellung mit sprunghaften Änderung jedoch nicht umgehen kann, reagiert sie stark verzögert und dann selbst sprunghaft auf den

Krafteinbruch. Kein Kontakt zwischen Bolzen und Welle sind auch der Grund für den gezündeten Lichtbogen, welcher zur Unterbrechung der Stromzufuhr führte.

Die Auswertungen der Drehzahlmessung entspricht der von Versuch g. Bei allen Versuchen schwankte die Drehzahl um ca. 10 % bei Einsetzen der Wellendrehung. Die Datenreihen sind im Anhang – Phase 2 aufgeführt.

Erkenntnisgewinn Phase 2

Das Reproduzieren der Ergebnisse mit Kupfer von Nguyen [12] war bedingt möglich. Abweichungen werden mit Unterschieden im Bolzen- und Wellendurchmesser erklärt. Das Einsetzen der Stromquelle zur Widerstandserwärmung am Kontaktwiderstand zwischen Bolzen und Welle gelingt und die Temperaturmessdaten zeigen, dass ausreichend Energie zum Erreichen der notwendigen Temperatur mit Kupfer zur Verfügung gestellt werden kann. Dennoch werden keine positiven Beschichtungsergebnisse produziert, was auf die Regelungstechnik der Anlage zurückgeführt wird. Im Prozess verlieren Bolzen und Welle den Kontakt, weshalb ein Lichtbogen gezündet wird, was zum Abbruch des Stromimpulses führt. Die Werkzeugmaschine ist auf das Reibbeschichten massiver Bauteile ausgelegt. Daher ist die Mess- und Regelungstechnik der axialen Kraft nicht für die niedrigen Kräfte ausgelegt. Ein Einsatz unter 1 kN axialer Kraft ist nicht regelbar.

Ein softwareseitiges Optimieren des PID-Reglers war sowohl durch SITEC Industrietechnologie GmbH untersagt als auch durch den Projektausschuss nicht erwünscht. Aus diesem Grund wurden keine weiteren Versuche an der Anlage unternommen. Die Beschichtungsanlage 1 (s. Abschnitt 4.1) wird erneut in Betrieb genommen und im weiteren Verlauf Beschichtungsanlage 3 (s. Abschnitt 4.3) aufgebaut.

5.3 Phase 3 – Anlagenwechsel, Konstruktive Adaption, Versuche

Mit dem Ausschluss der Beschichtungsanlage 2 (s. Abschnitt 4.2) erfolgt die erneute Inbetriebnahme von Beschichtungsanlage 1 (s. Abschnitt 4.1) und der Wechsel zu Beschichtungsanlage 3 (s. Abschnitt 4.3). Aus den Anlagenwechseln resultiert die Notwendigkeit mit grundlegenden Parameterstudien erste Beschichtungsergebnisse zu erzielen.

Zielstellung und Planung

Zum Ende der Phase 3 soll eine Versuchsanlage zum Beschichten von Laborproben in Betrieb genommen sein. Auf der Beschichtungsanlage sind Parameter zum Beschichten

erarbeitet. Die Versuche zur Parameterfindung wurden mit einer intuitiv aufbauenden Versuchsmatrix abgedeckt. Dabei wurde die Kraft auf 400 N konstant gehalten und die Parameter Vorschub, Drehzahl, Stromstärke und Stromzeit intuitiv nach einer Ergebniskontrolle des Vorversuchs variiert. Auf Basis der gefundenen Beschichtungsparameter ist ein Umgebungsparameterfeld strukturiert mit einem teilfaktoriellen Versuchsplan abgebildet worden (s. Abbildung 37/Abbildung 38). Auftretende Unregelmäßigkeiten im Beschichtungsprozess werden ergründet und die erzeugte Schichtqualität bewertet.

Versuchsdurchführung und Diskussion

Beschichtungsversuche auf Anlage 1 zeigten, dass mit Beginn eines erfolgsversprechenden Beschichtungsprozesses das Drehmoment der Fräsmaschine nicht ausreichend war, um Material vom Bolzen abzuscheren. Stattdessen hat das Anhaften des Bolzens auf dem Substrat dazu geführt, dass die Spindel der Fräsmaschine bis zum vollständigen Stillstand ausgebremst wurde. Die Konstruktionen sind weiter angepasst worden und auf die vertikale Fräsmaschine (s. Abschnitt 4.3) übertragen worden. Während der Versuche wurde die Anlage fortlaufend bis zu dem im Abschnitt 4.3 beschriebenen Stand erweitert. Als Ergebnis sind Parameter mit CW008A und Nickel gefunden worden, welche zu einem Auftrag führen. Die Parameter von Nickel sind auf den Einsatz von Ni620 – Lotbolzen übertragen worden. Im Anhang – Phase 3 sind die Parameter der Versuche aufgeführt. Die Ni620 – Lotbolzen wurden von Projektpartnern bereitgestellt und sind aktuell nicht im Handel erhältlich. Zur Herstellung ist Ni620 – Lotpulver in einer entsprechenden Form unter Vakuum aufgeschmolzen worden. Im Anschluss ist die Form abgedreht worden, wodurch der Lotbolzen zur Verwendung als Reibbolzen freigelegt wurde. Durch den Herstellungsprozess bedingt ergab sich eine mäßige Qualität der Ni- Reibbolzen. Defekte wie durchgehenden Lunkern und Poren in der Struktur sind in Abbildung 30 gezeigt. Der Einfluss dieser Defekte auf die Beschichtungsqualität wird im Abschnitt „Hybrid – Reibbeschichtung Lot: Ni620“ weiter erläutert.

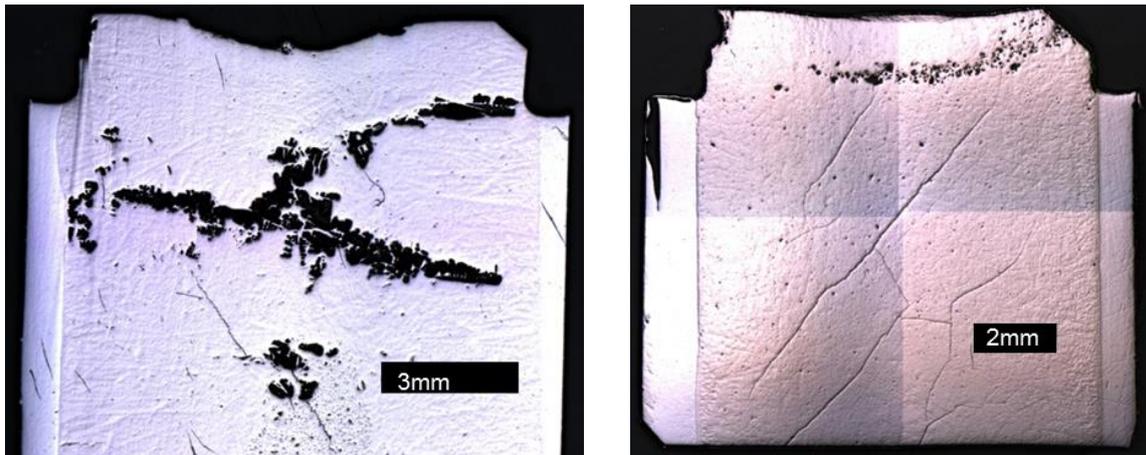


Abbildung 30: Ni620 – Lotbolzendefekte

Im Folgenden werden die Auftragsergebnisse dargestellt.

5.3.1 Hybrid – Reibbeschichtung Lot: CW008A

In Abbildung 31 ist die erzielte Beschichtung auf S235 in Aufsicht und im Querschnitt dargestellt. Die Beschichtungsspur wurde mit den in Tabelle 13 aufgeführten Parametern erzeugt.

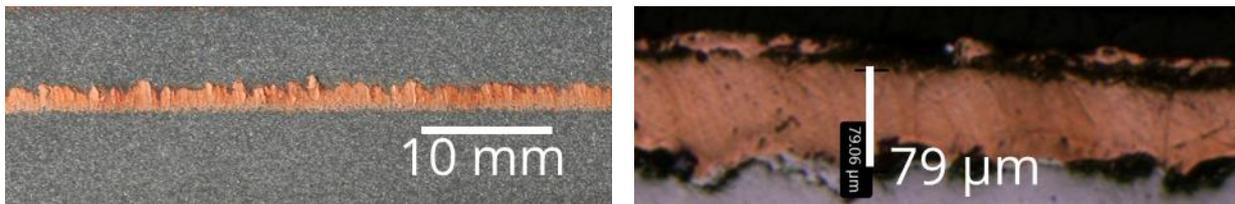


Abbildung 31: Hybrid – Reibbeschichtung Lot: CW008A, Substrat: S235

Tabelle 13: Parameter Lot: CW008A, Substrat: S235

Bolzendrehzahl n_B /U/min	Kraft F /kN	Vorschub /mm/min	Stromstärke I /kA	Stromzeit t_s /ms	Winkel α /°	Kühlung
900	0,4	250	2	80-5-40-5	15	aktiv

Der Schichtauftrag mit CW008A auf S235 wurde mit den Versuchen in einer Breite von bis zu 2 mm und mit einer Schichtstärke bis zu 80 µm aufgetragen. Die Angabe der Stromzeit beschreibt eine Strompulsstruktur, wie in Abbildung 32 gezeigt. Diese Impulse wurden eingesetzt, um die Erwärmung anhand des Stoffwiderstands im gesamten Bolzen zu reduzieren und stattdessen die Konzentration der Wärme am Kontaktwiderstand zu maximieren.

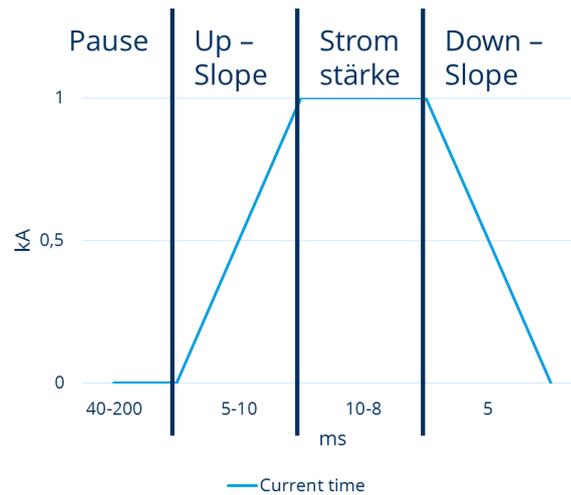


Abbildung 32: Stromimpulsstruktur zur Konzentration der Wärmeentwicklung

Somit beschreibt eine Zahlenfolge, wie in Tabelle 13 Spalte „Stromzeit“, 80-5-40-5 ms Pause – Up-Slope – Stromstärke – Down-Slope eines Pulses. Diese Pulse wurden kontinuierlich aneinandergereiht. Steht eine einzelne Zahl da, ist kein Impuls eingesetzt worden, sondern konstanter Gleichstrom für diese Zeit in fortlaufender Folge.

In Abbildung 33 ist die erzielte Beschichtung auf 1.4301 in Aufsicht und im Querschnitt dargestellt. Die Beschichtungsspur wurde mit den in Tabelle 14 aufgeführten Parametern erzeugt.

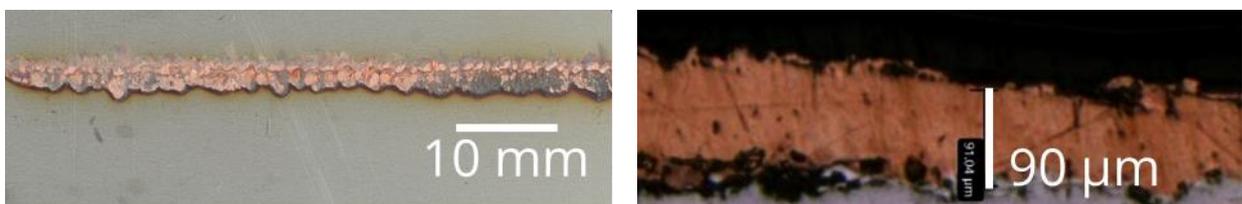


Abbildung 33: Hybrid – Reibbeschichtung Lot: CW008A, Substrat: 1.4301

Für die gezeigten Aufträge ist dieselbe Spur mit einem Bolzen mehrfach bei Einsatz gleichbleibender Parameter abgefahren worden.

Der Schichtauftrag mit CW008A auf 1.4301 wurde mit den Versuchen in einer Breite von bis zu 4 mm und mit einer Schichtstärke bis zu 90 µm aufgetragen.

Tabelle 14: Parameter Lot: CW008A, Substrat: 1.4301

Bolzendrehzahl n_B /U/min	Kraft F /kN	Vorschub /mm/min	Stromstärke I /kA	Stromzeit t_s /ms	Winkel α /°	Kühlung
1120	0,4	125	2,5	80-5-20-5	15	aktiv

Über alle Versuche hinweg hat sich keine Möglichkeit ergeben die Auftragsdicke oder -breite an Kupfer zu erhöhen. Überprüfte Ansätze waren die Variation der Bolzengeometrie durch Abdrehen eines Absatzes und Bohren eines zentrierten Lochs zur Wärmekonzentration im Kontaktinterface sowie die Installation einer pneumatischen Bolzenkühlung. Abbildung 34 zeigt die eingesetzten Bolzengeometrien.

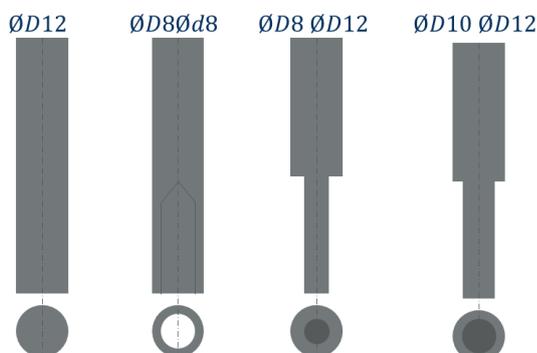


Abbildung 34: Eingesetzte Bolzengeometrievarianten

Mit CW008A sind alle Geometrien überprüft worden. Ebenso mit reinem Nickel. Die Ni620 – Lotbolzen sind herstellungsbedingt nur mit Bolzen der Geometrievariante Ø10 ØD12 (s. Abbildung 34) eingesetzt worden.

5.3.2 Hybrid – Reibbeschichtung Lot: Ni620

In Abbildung 35 ist die erzielte Beschichtung auf S235 in Aufsicht und im Querschnitt dargestellt. Die Beschichtungsspur wurde mit den in Tabelle 15 aufgeführten Parametern erzeugt.

Tabelle 15: Parameter Lot: Ni620, Substrat: S235

Bolzendrehzahl n_B /U/min	Kraft F /kN	Vorschub /mm/min	Stromstärke I /kA	Stromzeit t_s /ms	Winkel α /°	Kühlung
710	0,4	250	1	1500	15	aktiv

Der Schichtauftrag mit Ni620 auf S235 wurde mit den Versuchen in einer Breite von bis zu 10 mm und mit einer Schichtstärke bis zu 600 µm aufgetragen.

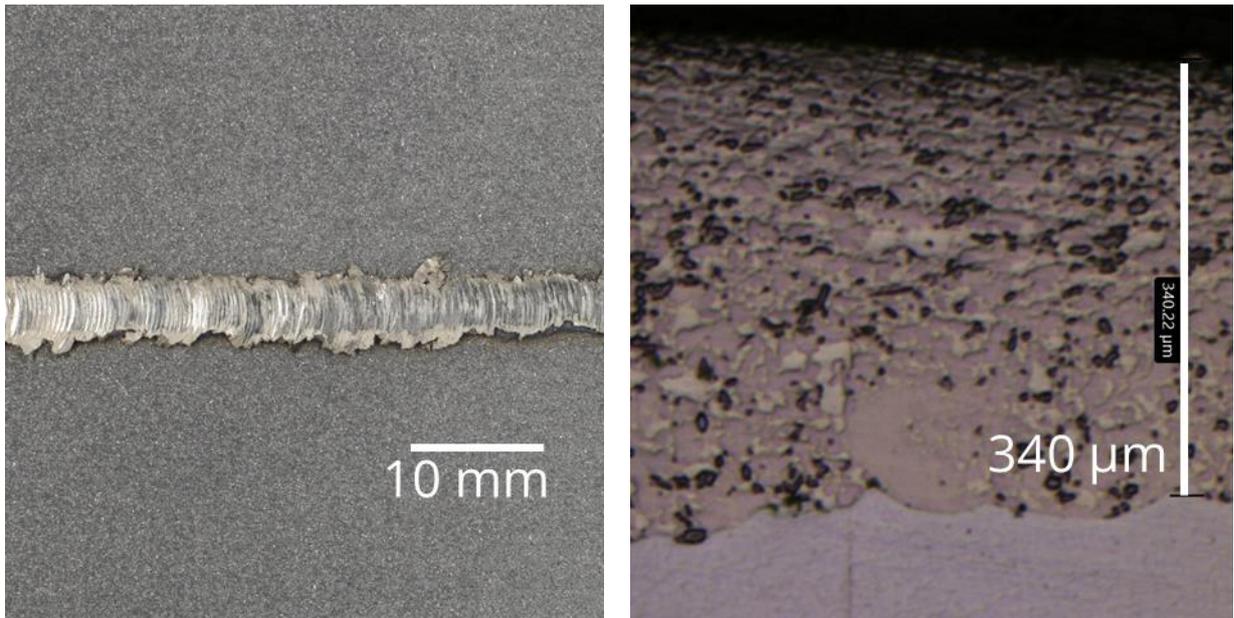


Abbildung 35: Hybrid – Reibbeschichtung Lot: Ni620, Substrat: S235

In Abbildung 36 ist die erzielte Beschichtung auf 1.4301 in Aufsicht und im Querschnitt dargestellt. Die Beschichtungsspur wurde mit den in Tabelle 16 aufgeführten Parametern erzeugt.

Der Schichtauftrag mit Ni620 auf 1.4301 wurde mit den Versuchen in einer Breite von bis zu 10 mm und mit einer Schichtstärke bis zu 400 µm aufgetragen. Auf beiden Substraten ist es möglich Schichten mit Ni620 – Lot aufeinander aufzureiben und somit dickere Schichtstärken zu erreichen.

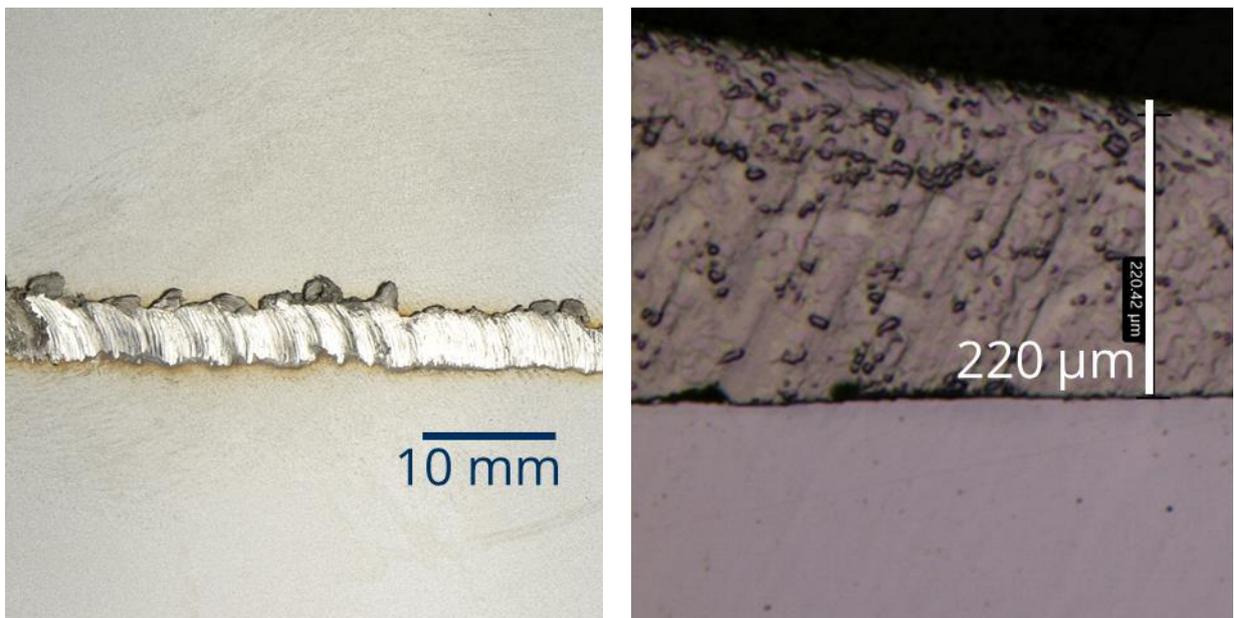


Abbildung 36: Hybrid – Reibbeschichtung Lot: Ni620, Substrat: 1.4301

Tabelle 16: Parameter Lot: Ni620, Substrat: 1.4301

Bolzendrehzahl n_B /U/min	Kraft F /kN	Vorschub /mm/min	Stromstärke I /kA	Stromzeit t_s /ms	Winkel α /°	Kühlung
710	0,4	250	1	1500	15	aktiv

Da mit Ni620 – Lotbolzen im Gegensatz zu CW008A – Bolzen ein breites Parameterfeld zu Auftragserfolg führte, wurde für die Ni620 – Lot auf 1.4301 Substrat Parameterfelder abgebildet, welche in Abbildung 38 zu sehen sind. Die Parameterfelder sind mit einem teilfaktoriellen Versuchsplan ermittelt worden. Grüne markierte Parameter erzeugten einen durchgängigen Auftrag, gelb markierte Parameter einen unterbrochenen Auftrag, rot markierte Parameter keinen Auftrag und unmarkierte Parameter wurden in der Versuchsdurchführung ausgelassen. Unterbrechungen in der Spur oder auch spontane Dickenunterschiede, werden zum Großteil auf die ungleichmäßige Bolzenstruktur (s. Abbildung 30) zurückgeführt. Die Lunker führen zu einer Wärmekonzentration, welche einen höheren Erweichungsbereich des Lotbolzens zur Folge hat und somit erhöhten Materialaufrieb oder –verlust. Dies hat Phasen mit geringerer Temperatur nach dem spontanen Masseverlust des Bolzens als Konsequenz, also einen dünneren Auftrag zur Folge. Allgemein folgt eine ungleichmäßige Schichtstruktur. Außerdem ist aus dem einen nicht erfolgreichen Auftrag (s. Abbildung 38, rote Markierung) in den Parameterfeldern ersichtlich, dass der primäre Einflussfaktor auf ein Beschichtungsergebnis die bereitgestellte Energie, also die Wärmeentwicklung und –konzentration darstellt.

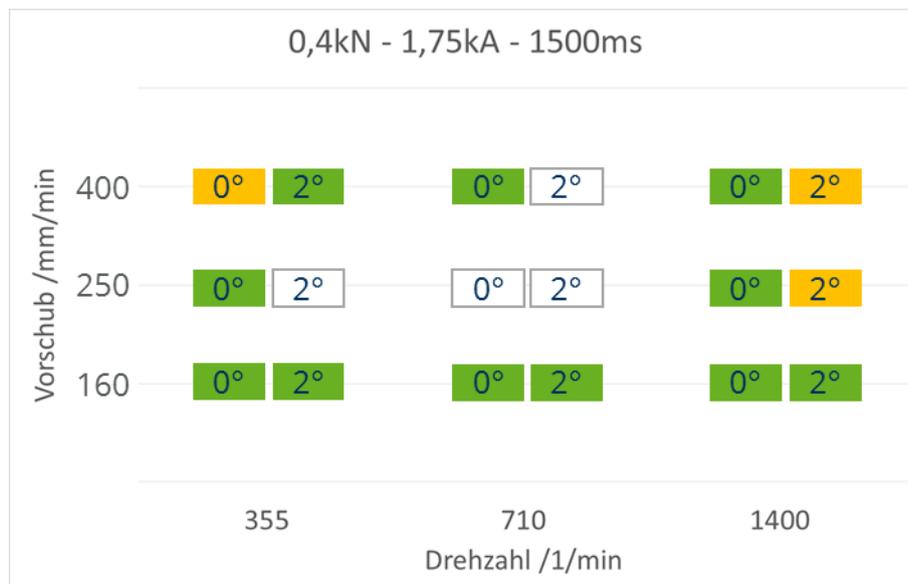


Abbildung 37: Teilfaktorielles Parameterfeld; Lot: Ni620, GW: 1.4301; Konstante Parameter: Kraft, Stromstärke, Stromzeit; Variierte Parameter: Vorschub, Drehzahl, Reibbolzenneigungswinkel

Die Parameterfelder weisen dem Prozess in den Möglichkeiten der aufgebauten Versuchsanlage einen vielseitigen Parameterbereich nach.



■ = Durchgängiger Auftrag ■ = kein Auftrag
■ = unterbrochener Auftrag = Parameter ausgelassen

Abbildung 38: Teilfaktorielles Parameterfeld; Lot: Ni620, GW: 1.4301; Konstante Parameter: Drehzahl, Vorschub, Reibbolzenneigungswinkel; Variierte Parameter: Kraft, Stromzeit, Stromstärke

Auf Basis der erarbeiteten Erfahrungen wurde ein Model zur Simulation der elektrischen Erwärmung aufgebaut. Mit den aufgeriebenen Schichten sind im weiteren Bearbeitungsverlauf Proben zum Nachweis der Einsetzbarkeit im Lötprozess erstellt und verlötet worden. Außerdem wurde die Haftfestigkeit der aufgeriebenen Schichten bewertet.

5.3.3 Probenverzug im Beschichtungsprozess

Bei der Herstellung der zu verlötenden Scherzugprobenhälften fiel eine Krümmung der beschichteten Probenhälfte auf. Abbildung 39 verdeutlicht dies anhand einer bereits verlöteten Scherzugprobe. Die Krümmung ist für Überlappverbindungen hinderlich, daher wird nach Ursachen gesucht.

Zur Bewertung dieses Verzugs und der Ermittlung der Entstehungsursachen ist ein Blech mit mehreren Schichten versehen worden. Vor und nach der Beschichtung wurde ein Ausschnitt des Blechs konfokal vermessen, um den auftretenden Verzug zu dokumentieren. Abbildung 40 zeigt den Ausgangszustand.

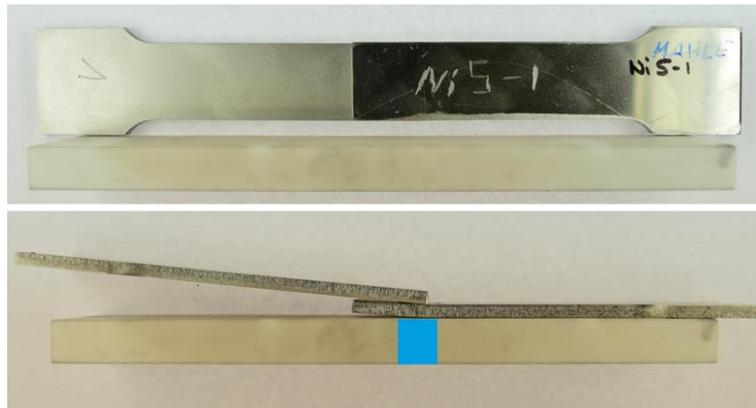


Abbildung 39: Verlötete Scherzugprobe mit Markierung des durch Hybrid-Reibbeschichten beeinflussten Bereichs

Links sind die Messdaten, welche die Distanz des Blechs von der Messstelle abbilden, und rechts die Messspuren nummeriert. Das Messfeld deckt einen Bereich von 30 mm auf 45 mm ab. Das Diagramm zeigt, dass das Blech im Ausgangszustand eine geringe Verformung um 300 μm aufweist. In das Messfeld sind drei Beschichtungsspuren aufgerieben worden. Abbildung 41 zeigt den Endzustand der Versuche. Die Zwischenzustände sind im Anhang unter „Anhang – Phase 3“ Abbildung 62 und Abbildung 63 aufgeführt.

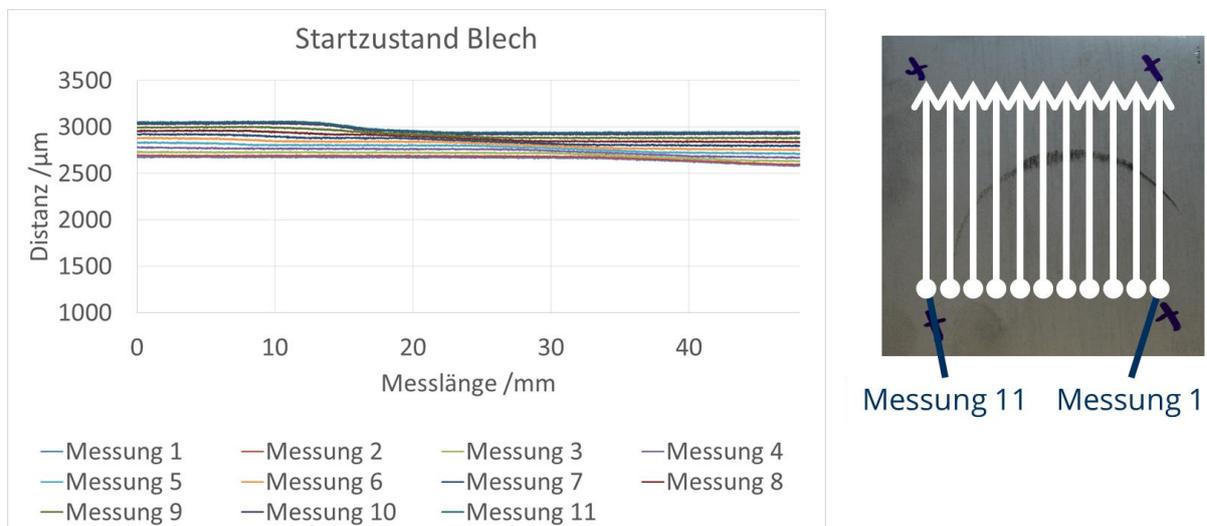


Abbildung 40: Konofokalmessung – links: Ausgangszustand; rechts: Darstellung des Messfelds

Von Auftrag zur Auftrag stellt sich eine wachsende Verformung des Substrates ein bis hin zu einer Krümmung von 1,2 mm über eine Länge von 30 mm. Diese Krümmung ist im industriellen Einsatz des Verfahrens hinderlich.

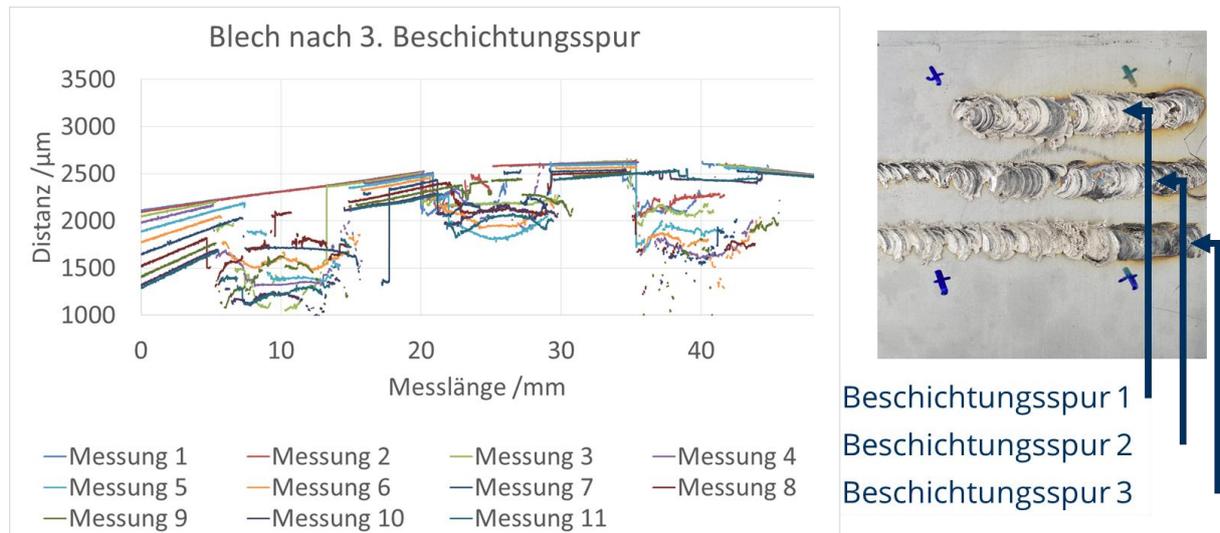


Abbildung 41: Konfokale Messung – links: Messung nach drei Beschichtungsspuren; rechts: Nummerierung der Beschichtungsspuren

Die Ursachenforschung bezog sich auf die Auswertung von Querschliffen der Schichtaufträge auf der Suche nach Wärmeeinflusszonen, welche zu einem Spannungszustand führen könnten. Abbildung 42 zeigt links die Auswertung der Probenkrümmung unter dem Mikroskop und rechts den Versuch eine Wärmeeinflusszone zu bewerten. Die Auswertungen zeigen über alle Lot-Grundwerkstoffkombinationen hinweg, dass trotz entsprechender Probenpräparation keine ausgeprägte Wärmeeinflusszone nachgewiesen werden konnte. Die Schlussfolgerung aus diesen Auswertungen ist, dass eine Wärmeeinflusszone keine Ursache der Verformung sein kann. Stattdessen wird vermutet, dass die abkühlenden Schichten zu Spannungen auf der Substratoberfläche führen und somit einen Verzug bewirken. Diese Einschätzung wird durch die Tatsache gestützt, dass, obwohl mit Kupfer im Prozess geringere Temperaturen herrschen, dennoch ähnlich ausgeprägter Verzug eintritt. Ein anderer Ansatz zur Begründung des Verzugs könnte auch der Versuchsaufbau sein, welcher die Substratbleche mittig gespannt hat und deren Wärmeausdehnung in eine Richtung verhindert hat, sodass Spannungszustände durch geringfügige Wärmeausdehnung eintreten könnten. Beide Möglichkeiten stellen Vermutungen dar, welche in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss nicht tiefergehend untersucht worden sind.

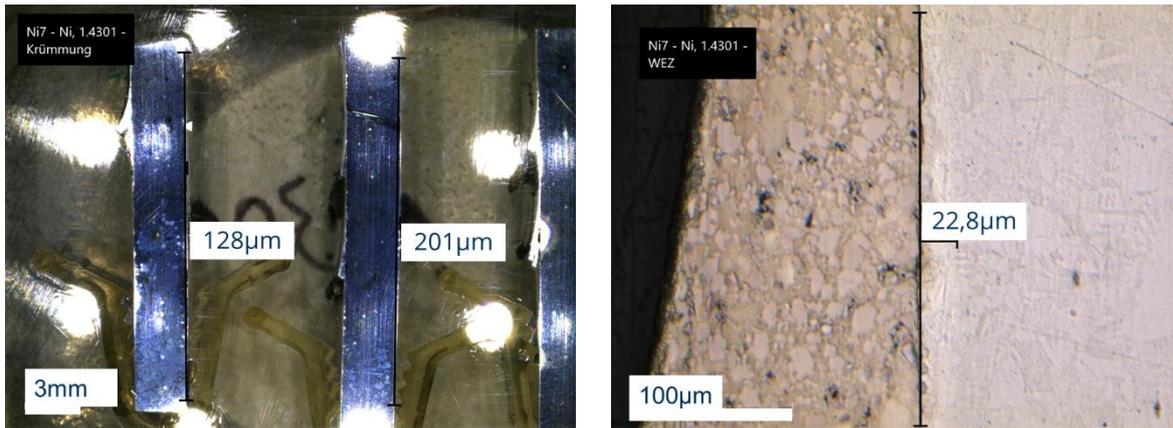


Abbildung 42: Lot: Ni620, GWST: 1.4301; links: Krümmungsbewertung unter dem Mikroskop; rechts: Bewertungsversuch einer Wärmeeinflusszone

5.3.4 Haftfestigkeitsbewertung der erzeugten Schichten

Die Bewertung der Haftfestigkeit erfolgt durch MHW Ingenieur- und Sachverständigenbüro. Im Folgenden wird ausschnittsweise aus dem erhaltenen Prüfprotokoll berichtet.

Es erfolgte eine Prüfung in Anlehnung an die DIN SPEC 91064. Ziel war die Prüfung der Haftfestigkeit bei einer im Vorversuch gleichmäßigen Prüflastaufbringung mit einem keilförmigen Eindringkörper bis in die Ebene des Substrates. Anschließend werden die Eindrücke und evtl. eingetreten Einrisse und Ablösungen der Schicht vom Substrat bildlich und anhand von Kraft-Weg-Kurven dokumentiert. Die keilförmige Geometrie der Schicht erweist sich als ungünstig, da aufstehende Kantenbereiche eher zu Abbruch neigen. Die Versuchsanordnung wird in Abbildung 43 links gezeigt. Rechts wird der Eindruck des Eindringkörpers verdeutlicht.



Abbildung 43: Haftfestigkeitsprüfung; links: Versuchsaufbau, rechts: Versuchsergebnis

Beispielhaft wird in Abbildung 44 das Prüfungsergebnis anhand von Ni620 auf 1.4301 gezeigt. Die weiteren Prüfprotokolle sind im Anhang unter „Anhang – Phase 3“ ab Abbildung 64 zu finden.

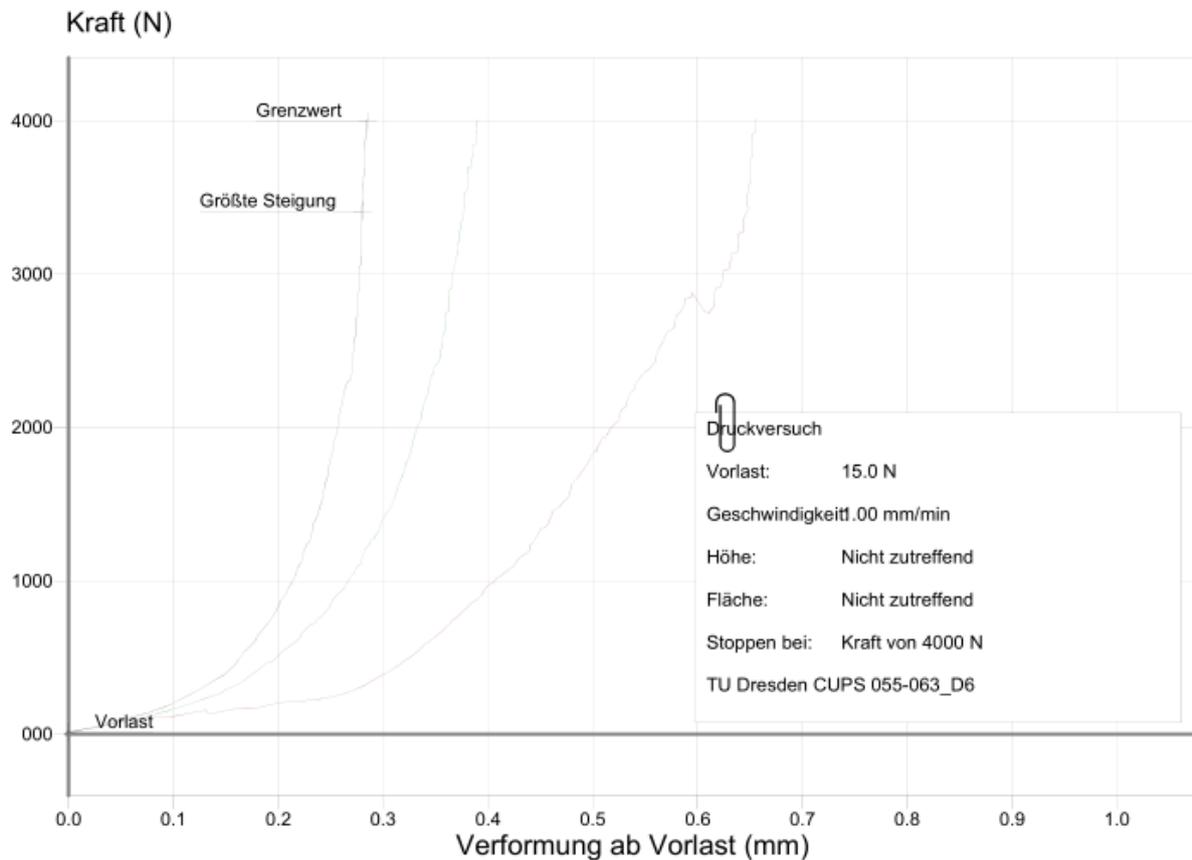


Abbildung 44: Kraft-Weg-Diagramm der ausgewerteten Proben Ni620 auf 1.4301

Die Kurven zeigen einen gleichmäßigen Anstieg bei guter Verformung. Die rechte Kurve hat bei ca. 2,8 kN ein Plateau. Diese deutet auf eine Abplatzung der keilförmigen Schicht hin. Nachvollziehbar ist, dass die Keilstruktur an ihrer Materialanhäufung zu Abplatzungen neigt. Die Haftfestigkeitsprüfung zeigt im Allgemeinen, dass die eingesetzten weichen Werkstoffe zu keiner auffälligen Rissbildung oder Ausplatzung neigen. Eine ausreichende Haftfestigkeit ist demnach gegeben.

Erkenntnisgewinn Phase 3

Aus den diskutierten Versuchen kann für die Anlagentechnik abgeleitet werden, dass eine Werkzeugmaschine auf Basis einer Fräsmaschine für einfache Beschichtungsaufgaben (z.B. einzelne gerade Beschichtungsspur) ausreicht. Beide gewählten Lote können durch Hybrid-Reibbeschichten appliziert werden. Mit den Kupferlot-Reibbolzen ist das Prozessfenster auf wenige funktionierende Parametersätze begrenzt. Alle zusätzlich zu der Variation der Parameter Vorschub, Drehzahl,

Stromstärke und Stromzeit ergriffenen Maßnahmen, wie die Variation Bolzengeometrie oder die Integration einer Bolzenkühlung, zeigten keinen Einfluss auf das Beschichtungsergebnis. Mit den Nickellot-Reibbolzen ist trotz stark schwankender Bolzenqualität in Form von Lunkern und Einschlüssen das Beschichten in einem breiten Parameterfeld möglich. Während der Beschichtung tritt ein Verzug der Proben auf, welcher auf die Eigenspannung der aufgetragenen Schichten sowie die Probeneinspannung zurückgeführt wird. Es konnte keine durch den Beschichtungsprozess entstandene Wärmeeinflusszone detektiert werden. In anschließenden Lötversuchen ist der Verzug durch zurückbiegen ausgeglichen worden. Die Schichtaufträge sind einer Haftfestigkeitsprüfung unterzogen worden. Als Ergebnis dieser Haftfestigkeit wird festgehalten, dass die Schichten zu keiner auffälligen Rissbildung oder Ausplatzung neigen und sich weiterhin entsprechend den Werkstoffen Kupfer und Nickel duktil verhalten.

Im weiteren Verlauf werden diese Erkenntnisse dazu eingebracht den Wirkmechanismus hinter der Beschichtung weiter zu ergründen. Außerdem werden Proben zum Löten und Vergleichen mit einer Lotpaste hergestellt.

5.4 Phase 4 – Modelbildung, Validierung und Umweltverträglichkeit

5.4.1 Modellbildung

Berechnung, Simulation und Diskussion

Während der Versuche mit Kupfer ist die Annahme getroffen worden, dass Kupfer als Reibbolzen von dem im Abschnitt 1.4 beschriebenen thermo-mechanischen Prinzip (s. Abbildung 6) abweicht und sich daher die Ergebnisse von denen mit Ni620 – Lotbolzen unterscheiden. Eine Verdeutlichung der Aussage von Abbildung 6 mit Bezug auf den Wirkmechanismus Wärmeeintrag in den Bolzen zur Einstellung des gewünschten plastischen Zustands wird in Abbildung 45 getroffen. Demnach ist die Annahme, dass je nach Material die temperaturabhängigen Festigkeitskurven bzw. die Wärmeformbeständigkeit ausschlaggebend für ein positives Beschichtungsergebnis sind.

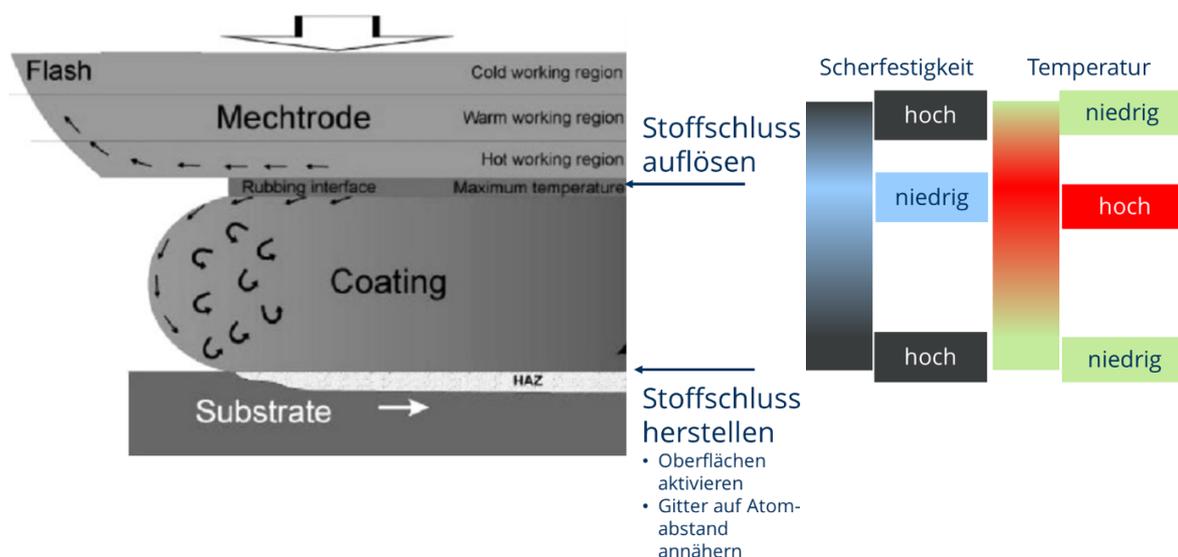


Abbildung 45: Einzustellende Scherfestigkeit und Temperatur

Anhand der Wärmeentwicklung ist ein Vergleich von Hybrid-Reibbeschichten mit Reibbeschichten möglich. Alle Formeln sind aus [30] entnommen. Dazu wird zunächst die Wärmeleistung \dot{Q}_{rot} (s. Formel 1) bezogen auf die Bolzenrotation ohne translatorische Bewegung (Rotation auf der Stelle) angenähert berechnet. Verluste an die Umgebung werden vernachlässigt. Es wird davon ausgegangen, dass die gesamte Reibenergie in Wärme umgesetzt wird. Ausgehend von der Wärmeleistung wird mit Formel 2 die Wärmedichte berechnet, mit welcher über eine weitere Umstellung (s. Formel 3) die Temperaturerhöhung im Bolzen mit Formel 4 berechnet werden kann. Zur Berechnung wird Kupfer auf Stahl herangezogen, weil hier Daten aus [12] und von eigenen Versuchen

vorliegen. Der Reibwert wird für Stahl – Kupfer mit $\mu = 0,2$ angenommen und die thermische Leitfähigkeit mit $\lambda = 350 \frac{W}{mK}$ [31]. Die Normalkraft wird für das Reibbeschichten mit $F_N = 2000N$ und für das Hybrid-Reibbeschichten mit $F_N = 400N$ angesetzt. Zudem wurde bedingt durch die Drehzahlstufen von Beschichtungsanlage 3 (s. Abschnitt 4.3) die Drehzahl beim Reibbeschichten ($n = 2400 \frac{1}{min}$) und dem Hybrid-Reibbeschichten ($n = 710 \frac{1}{min}$) unterschieden. Der Bolzendurchmesser ist mit 12 mm angesetzt und die freistehende Bolzenlänge mit 45 mm.

$\dot{Q}_{rot} = \mu * F_N * \frac{U}{2} * n$			<i>Formel 1: Wärmeleistung</i>		
\dot{Q}_{rot}	Wärmeleistung	W	μ	Reibwert	
F_N	Normalkraft	N	U	Umfang	mm^2
n	Drehzahl	$\frac{1}{s}$			
$q_{rot} = \frac{\dot{Q}_{rot}}{A}$			<i>Formel 2: Wärmedichte</i>		
q_{rot}	Wärmedichte	$\frac{W}{mm^2}$	\dot{Q}_{rot}	Wärmeleistung	W
A	Auflagefläche	mm^2			
$\Delta T_{rot} = \frac{q_{rot}}{\lambda}$			<i>Formel 3: Temperaturgradient</i>		
ΔT_{rot}	Temperaturgradient	$\frac{K}{mm}$	q_{rot}	Wärmedichte	$\frac{W}{mm^2}$
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\frac{W}{m * K}$			
$T_{rot} = \Delta T_{rot} * l$			<i>Formel 4: Temperaturerhöhung</i>		
T_{rot}	Temperaturerhöhung	K	ΔT_{rot}	Temperaturgradient	$\frac{K}{mm}$
l	Freistehende Bolzenlänge	mm			

Aus der Berechnung ergeben sich folgende Temperaturerhöhungen durch Reibenergie:

Tabelle 17: Temperaturerhöhung durch Reibenergie beim Hybrid-Reibbeschichten und Reibbeschichten

Hybrid-Reibbeschichten	Reibbeschichten
$T_{rot} = 20,3K$	$T_{rot} = 343K$

Die berechnete Temperaturerhöhung für das Reibbeschichten ist nahe der gemessenen Erwärmung in den vergleichenden Versuchen aus Abschnitt 5.2 (s. Abbildung 25, Temperaturbereich 350 – 460 °C) und ist eine gute Anlehnung an die in [12] aufgerufenen 400 °C. Die geringe Erwärmung durch die Reibenergie beim Hybrid-Reibbeschichten konnte mit dem eingesetzten Pyrometer nicht gemessen werden.

Für das Hybrid-Reibbeschichten wird weitergehend die Ohm'sche Erwärmung an der Kontaktstelle berechnet. Die Berechnung beruht auf Formel 5 und Formel 6.

$Q = I^2 * t * R$			<i>Formel 5: Stromwärme</i>		
Q	Wärmeenergie	W	I	Stromstärke	A
t	Zeit	s	R	Elektrische Widerstand	Ω
$Q = m * c_p * \Delta T$			<i>Formel 6: Wärmeenergie</i>		
Q	Wärmeenergie	W	m	Masse	kg
c_p	Spez. Wärmekapazität	$\frac{J}{kgK}$	ΔT	Temperaturdifferenz	K

Aus dem Umstellen nach ΔT ergibt sich mit den Parametern $I = 1,5 \text{ kA}$, $U = 0,4 \text{ V}$, $t = 30 \text{ s}$, $m = 0,081 \text{ kg}$ und $c_p = 385 \frac{J}{kgK}$ eine Temperaturdifferenz von $\Delta T = 577 \text{ K}$. An Beschichtungsanlage 3 (s. Abschnitt 4.3) wurde eine Temperaturerhöhung auf 480 °C mit Kupfer gemessen. Abweichung von Berechnung und Messung liegen in der Wärmeabhängigkeit aller elektrischen Widerstände im System, welche nicht berücksichtigt sind, und der vernachlässigten Wärmeableitung.

Zum besseren Verständnis der Wärmeentwicklung während des Hybrid-Reibbeschichtens ist auf dieser Basis eine thermo-elektrische FEM Simulation mit der Workbench von ANSYS® Academic Associate Mechanical, Release 19.2 modelliert und simuliert worden. Dies ist in [32] veröffentlicht. In der Visualisierung der Temperaturverteilung projiziert auf die 3D Geometrie des Modells zeigen Kupfer und Nickel als Bolzenmaterial deutliche Unterschiede (s. Abbildung 46). Mit Nickel bleibt die Wärme fokussiert in der Spitze des Reibbolzens. Der Kupferbolzen hingegen erwärmt sich über die komplette Länge des Bolzens fast gleichmäßig. Dies wird zurückgeführt auf die in etwa fünffach höhere Wärmeleitfähigkeit von Kupfer im Vergleich mit Nickel. Diese Wärmeleitfähigkeit beeinflusst sowohl die thermo-elektrische Erwärmung als auch die Reibwärme, weshalb Reibbeschichtungsversuche mit Kupfer auf verschiedenen Substraten ohne Hybridisierung bisher nicht erfolgreich waren [14].

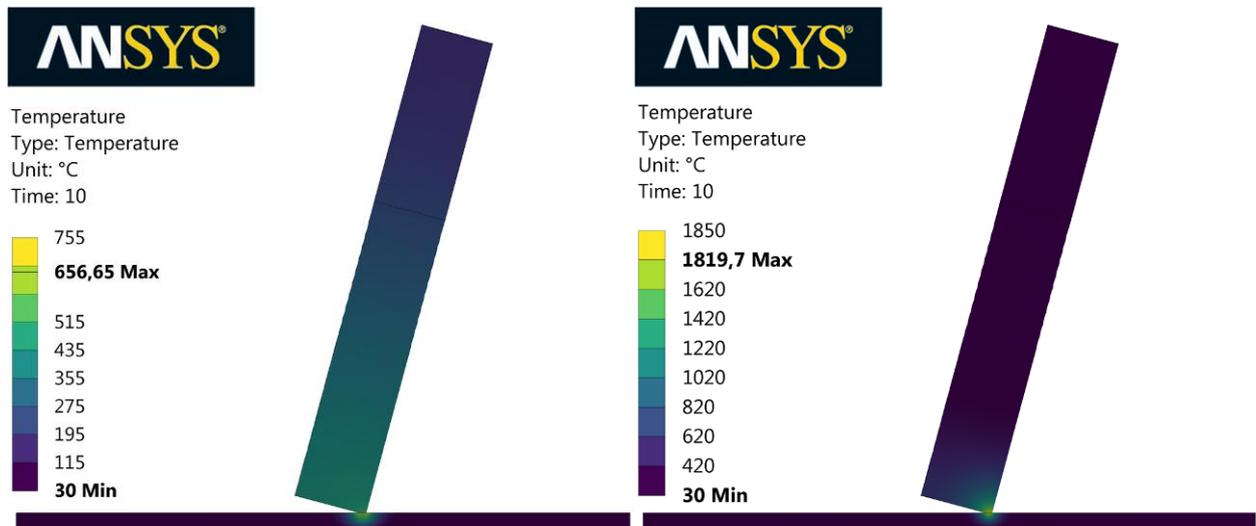


Abbildung 46: Links: Temperaturverteilung in einem Kupferbolzen nach 10 s; rechts: Temperaturverteilung in einem Nickelbolzen nach 10s; Substrat: 1.4301

Aus diesen Untersuchungen lässt sich ableiten, dass zusätzlich zum Erreichen und Halten einer Temperatur um die 400°C [12, S. 91] bei Kupfer auch die Erwärmung des gesamten Bolzens verhindert werden muss, sodass das thermo-mechanische Modell, welches im Abschnitt 1.4 (s. Abbildung 6) vorgestellt wurde, eingehalten wird. Anderenfalls stellen sich die diskutierten Working regions nicht oder in nur sehr kleiner Dimension ein, weshalb eine sehr dünne Beschichtungsschicht erzeugt wird. Im Gegensatz dazu stehen die Simulationsergebnisse mit Nickel in Übereinstimmung mit dem thermo-mechanischen Modell aus Abbildung 6 und der Veröffentlichung von Rafi et al. [33].

Erkenntnisgewinn Modelbildung

Mit dem Aufstellen und Berechnen der Erwärmung ist nachgewiesen, dass durch den Einsatz der Hybridisierung ausreichend Energie zur Durchführung des Prozesses alleine durch die Widerstandserwärmung bereitgestellt werden kann. In Verbindung mit einer Temperaturregelung, welche auf den elektrischen Strom als zu regelnden Parameter eingreift, können die notwendigen Temperaturen eingestellt werden. Eine Bolzenkühlung trägt zu einer gleichmäßigen Temperatur im Prozessinterface bei. Außerdem hat die Simulation die Unterschiede zwischen Nickel und Kupfer verbildlicht und somit gezeigt, welche Materialien sich gut und welche weniger gut für diesen Prozess eignen.

5.4.2 Validierung des Hybrid-Reibbeschichtens als Verfahren zur Belotung

Unter Validierung wird der Nachweis der Lötbarkeit mit hybrid-reibbeschichteten Lotspuren sowie der Vergleich mit den Lötgergebnissen mit Lotpaste verstanden.

Mit ersten Beschichtungserfolgen aus Phase 3 – Anlagenwechsel, Konstruktive Adaption, Versuche sind Proben für den im Abschnitt 4.5 erläuterten Konduktivprüfstand hergestellt worden. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Benetzungsversuche gegliedert nach Lot und Grundwerkstoff vorgestellt.

Versuchsdurchführung und Diskussion

Lot: Ni620; Grundwerkstoff: 1.4301

Die Benetzung der Lot – Grundwerkstoffkombination ist in Abbildung 47 dargestellt. Es werden vier Ausschnitte aus dem Video gezeigt. Der Versuchsbeginn, das Erreichen der Schmelztemperatur, das Erreichen der Löttemperatur und das Erstarren des Lötguts.

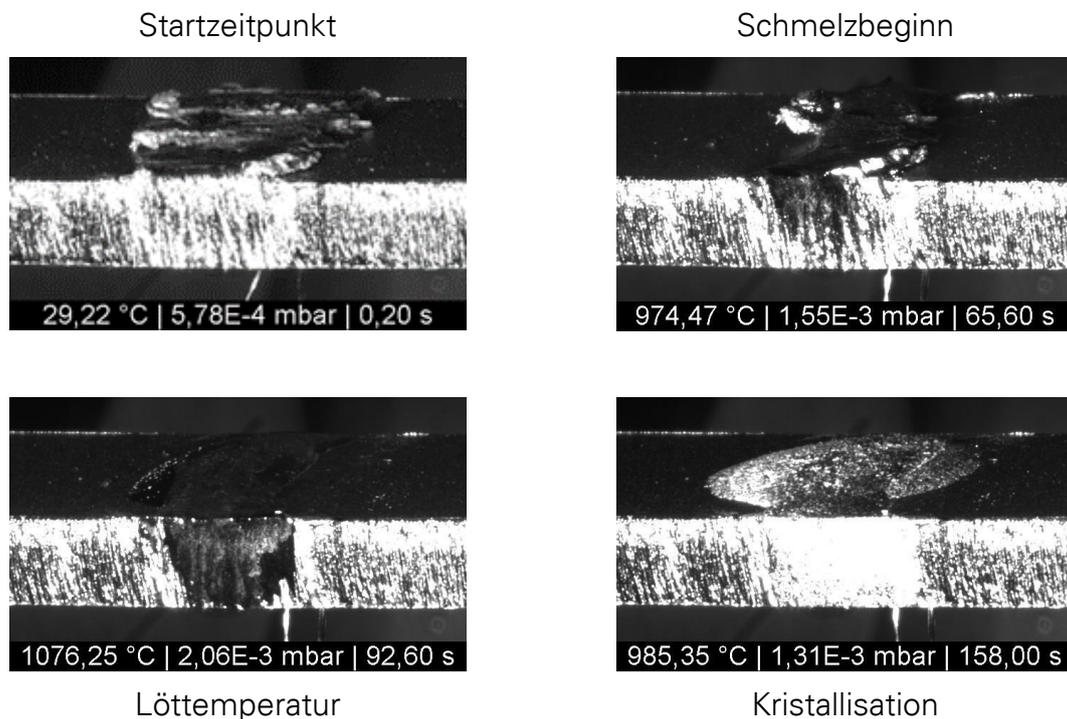


Abbildung 47: Benetzungsdokumentation von Ni620 appliziert durch Hybrid-Reibbeschichten auf 1.4301

Das durch Hybrid-Reibbeschichten applizierte Lot verhält sich entsprechend einem Lot und benetzt für alle Lot – Grundwerkstoffkombinationen vergleichbar dem in Abbildung 47 gezeigtem Benetzen.

Der weitere Nachweis der Lötbarkeit erfolgt daher durch das Auflöten eines Plättchens, um im Querschnitt das Fließverhalten und die Porenbildung bewerten zu können. In Abbildung 48 ist das Auflöten des Plättchens dargestellt. Mit Erreichen der Löttemperatur ist mit der Hybrid-Reibbeschichtung das Lotfließen entsprechend einer Lotpaste eingetreten.

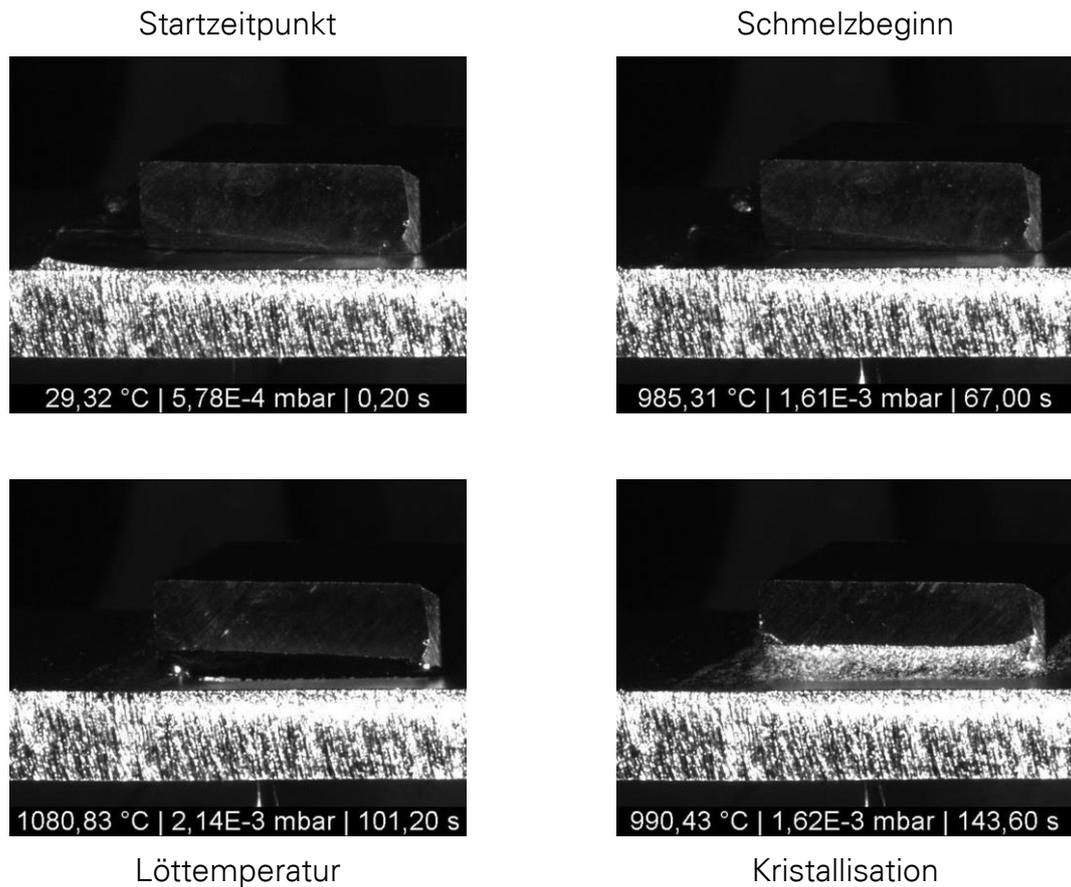
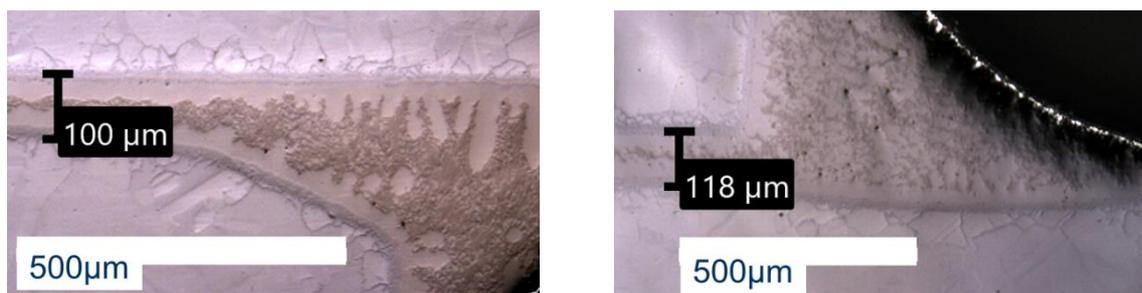


Abbildung 48: Auflötung mit Ni620 appliziert durch Hybrid-Reibbeschichten auf 1.4301

Es erfolgt eine vollständige und gleichmäßige Spaltfüllung. Im Querschnitt zeigen Lotpaste und Hybrid-Reibbeschichtung aus fertigungstechnischer Sicht keine Unterschiede, wie Abbildung 49 zeigt.



Hybrid-Reibbeschichtung

Lotpaste

Abbildung 49: Querschnitt der Auflötung mit Ni620 auf 1.4301

Lot: Ni620; Grundwerkstoff: S235

Das durch Hybrid-Reibbeschichten applizierte Lot verhält sich auf S235 entsprechend einer Lotpaste. In Abbildung 50 ist das Auflöten des Plättchens dargestellt. Mit Erreichen

der Löttemperatur ist mit der Hybrid-Reibbeschichtung das Lotfließen entsprechend einer Lotpaste eingetreten.

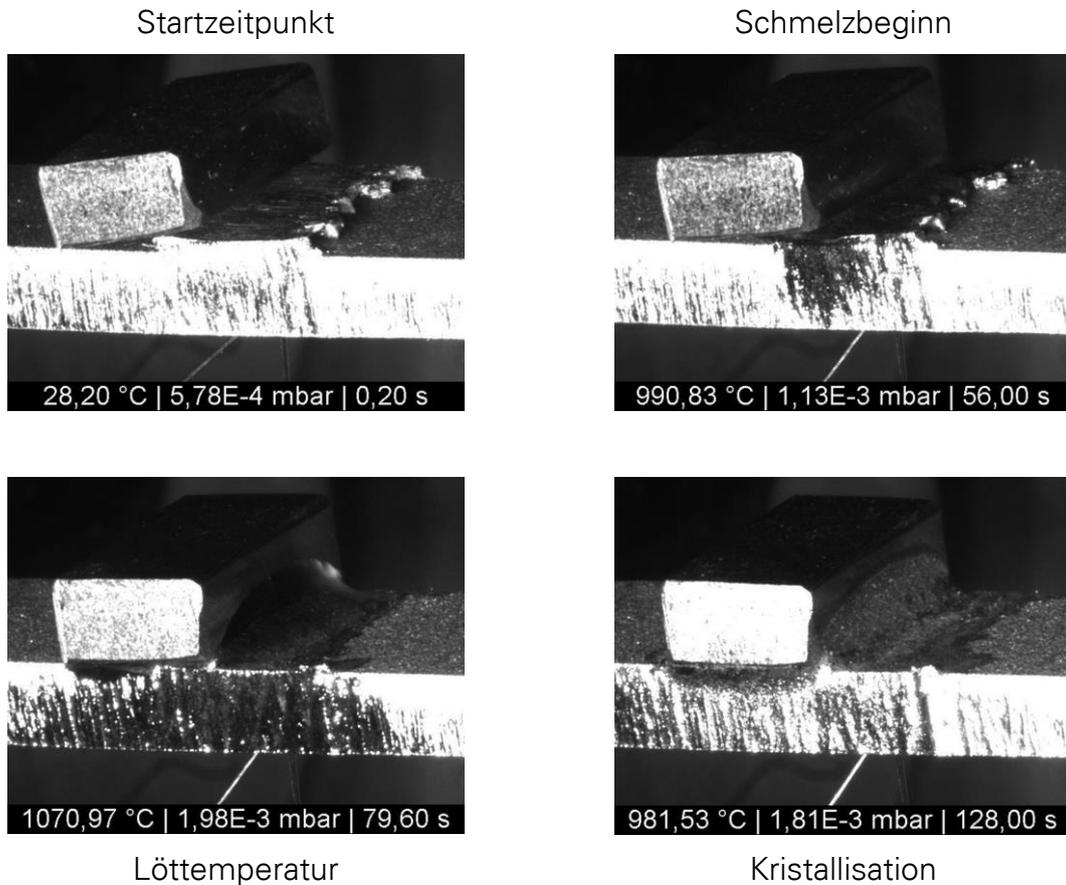
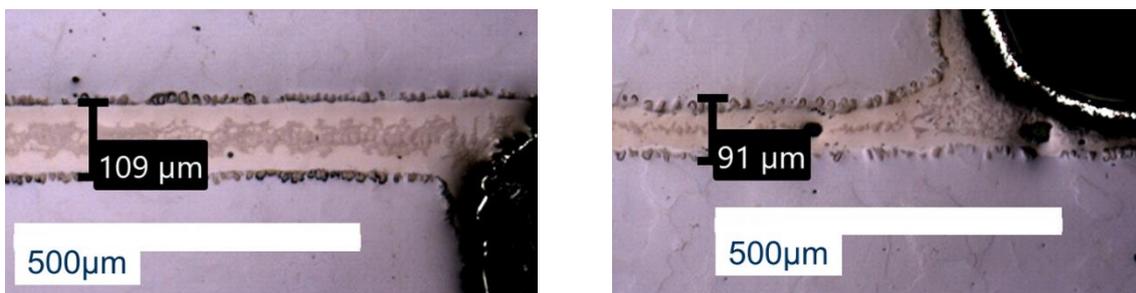


Abbildung 50: Auflötung mit Ni620 appliziert durch Hybrid-Reibbeschichten auf S235
Es erfolgt eine vollständige und gleichmäßige Spaltfüllung. Im Querschnitt zeigen Lotpaste und Hybrid-Reibbeschichtung auch auf S235 aus fertigungstechnischer Sicht keine Unterschiede, wie Abbildung 51 zeigt.



Hybrid-Reibbeschichtung

Lotpaste

Abbildung 51: Querschnitt der Auflötung mit Ni620 auf S235

Lot: CW008A; Grundwerkstoff: S235

Die Benetzung der Lot – Grundwerkstoffkombination ist in Abbildung 52 dargestellt. Das durch Hybrid-Reibbeschichten applizierte Lot verhält sich ebenfalls entsprechend einer Lotformteils aus CW008A und benetzt für alle Lot – Grundwerkstoffkombinationen. Wie in Abschnitt „Hybrid – Reibbeschichtung Lot: CW008A“ erläutert, sind die Schichten mit CW008A dünn und nicht ausreichend für eine vollständige Spaltfüllung.

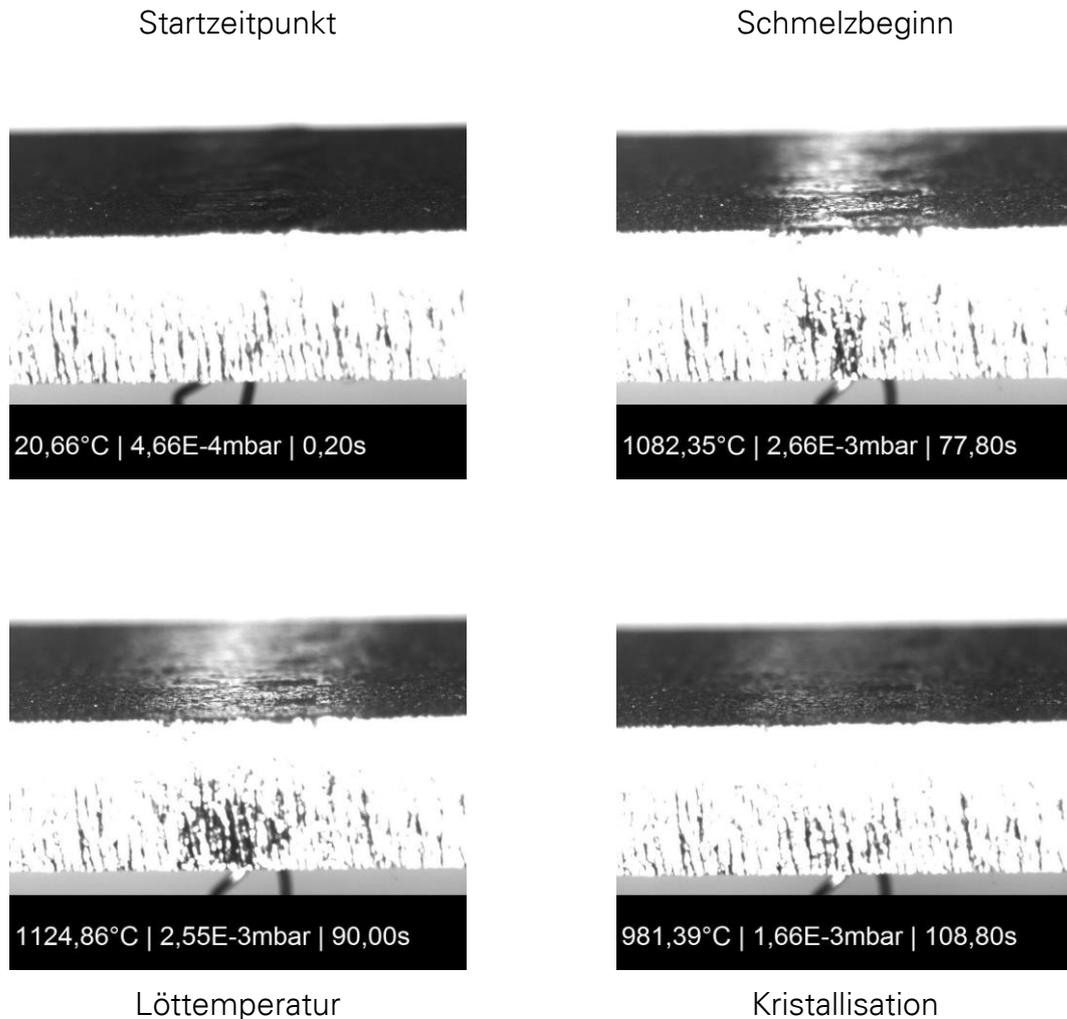


Abbildung 52: Benetzungsdokumentation von CW008A appliziert durch Hybrid-Reibbeschichten auf S235

Der weitere Nachweis der Lötbarkeit war dennoch durch das Auflöten eines Plättchens dokumentierbar. Abbildung 53 zeigt einen Ausschnitt aus dem Querschnitt im nicht vollständig gefüllten Lötspalt.

In Abbildung 54 ist das Auflöten des Plättchens auf S235 und dargestellt. Auf 1.4301 ist es mit weiteren Beschichtungsversuchen erst nach der Benetzungsdokumentation gelungen ausreichend Lot für eine ebenso geringfügige Benetzung zu beschichten. Eine Dokumentation der Benetzung erfolgte nicht. Auch ein Vergleich mit CW008A

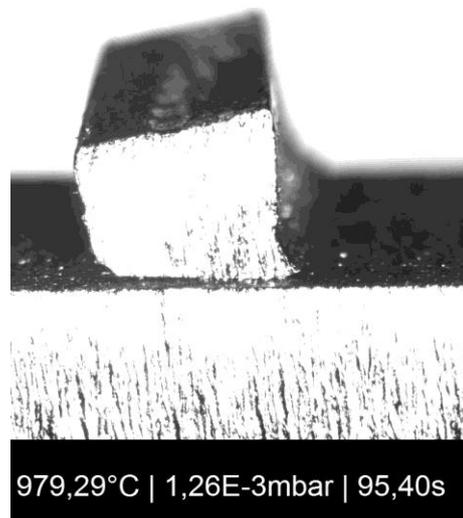
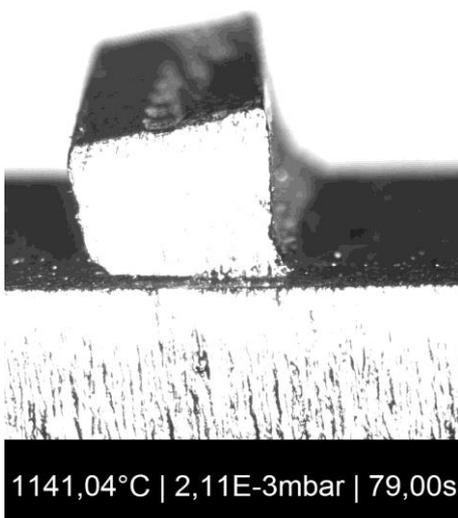
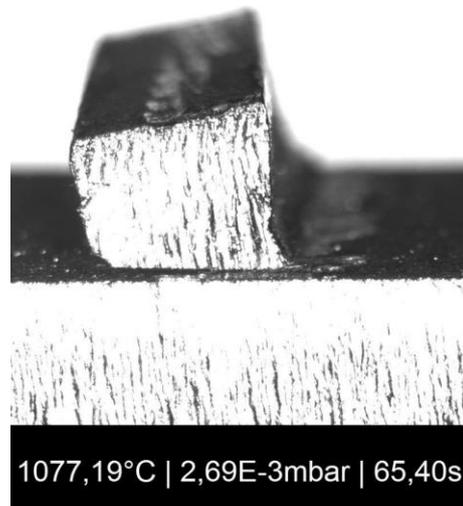
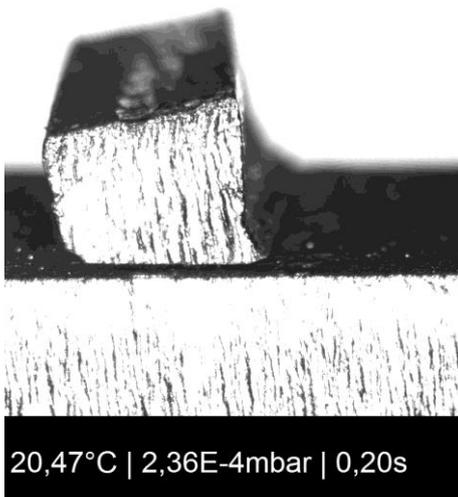
Lotformteilen erfolgte für beide Grundwerkstoffe aufgrund des geringen Beschichtungsdicken nicht.



Abbildung 53: Querschnitt der Auflötung mit CW008A auf S235

Startzeitpunkt

Schmelzbeginn



Löttemperatur

Kristallisation

Abbildung 54: Auflötung mit CW008A appliziert durch Hybrid-Reibbeschichten auf S235

Zur weiteren Validierung sind Scherzugproben mit Hybrid-Reibbeschichtungen von Ni620 sowie mit Ni620 Lotpaste hergestellt worden. Die hybrid-reibbeschichteten Proben sind von Mitgliedern des Projektausschusses in ihren Industrieöfen gelötet worden. Die Proben mit Ni620 Lotpaste sind nach Lothesterempfehlung im Vakuumofen der TU Dresden gelötet worden. Die aufgetragenen Lotmengen sind nicht vergleichbar, da es nicht gelungen ist die durch Hybrid-Reibbeschichten aufgetragene Lotmenge zu berechnen.

Scherzugproben, Lot: Ni620; Grundwerkstoff: S235

In Abbildung 55 sind die Scherzugversuche grafisch mit einem Kraft-Weg-Diagramm ausgewertet. Die Kennlinien M_S235_2, S_S235_2 und L_S235_2 sind die mit Hybrid-Reibbeschichten hergestellten Proben. Die Kennlinien Probe1_4 und Probe2 sind mit den Proben, welche mit Lotpaste hergestellt wurden, aufgezeichnet worden. Es ist zu erkennen, dass alle Versuche einen vergleichbaren Kraftanstieg haben. In ihrem Verlauf weicht nur die Probe M_S235_2 von den anderen ab. Diese liegt an der ausgeprägten Krümmung (s. Abschnitt 5.3.3), welche diese Probe hatte. Die ausgeprägte Streckgrenze trat bei den hybrid-reibbeschichteten Proben verstärkt wegen der Ausrichtung der o.g. Krümmung ein.

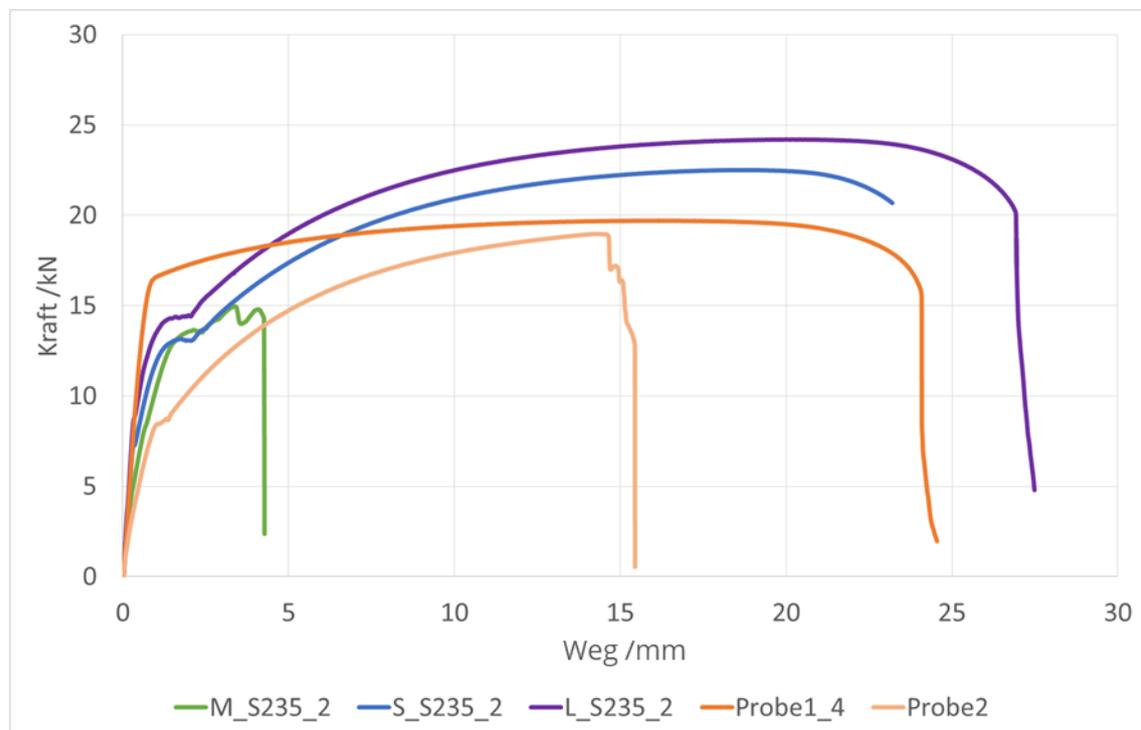


Abbildung 55: Lot: Ni620; Grundwerkstoff: S235; Scherzugauswertung – Kraft-Weg-Diagramm

Der Versagensfall für alle Proben außer M_S235_2 trat im Grundwerkstoff ein.

Scherzugproben, Lot: Ni620; Grundwerkstoff: 1.4301

In Abbildung 56 sind die Scherzugversuche grafisch mit einem Kraft-Weg-Diagramm ausgewertet. Die Kennlinien M_1.4301_2, S_1.4301__2 und L_1.4301__2 sind die mit Hybrid-Reibbeschichten hergestellten Proben. Die Kennlinien Probe3 und Probe4 sind mit den Proben, welche mit Lotpaste hergestellt wurden, aufgezeichnet worden. Allgemein weisen alle Proben einen vergleichbaren Kraftanstieg auf. Das zeitige Versagen der Proben S_1.4301_2 und L_1.4301_2 wird anhand der Bruchflächen auf eine zu geringe Lotmenge zurückgeführt. Das Versagen trat zudem mit Erreichen der Streckgrenze ein, also mit dem Ausgleichen des auf die Proben wirkenden Drehmoments, was ein weiteres Indiz für zu wenig Anbindungsfläche ist.

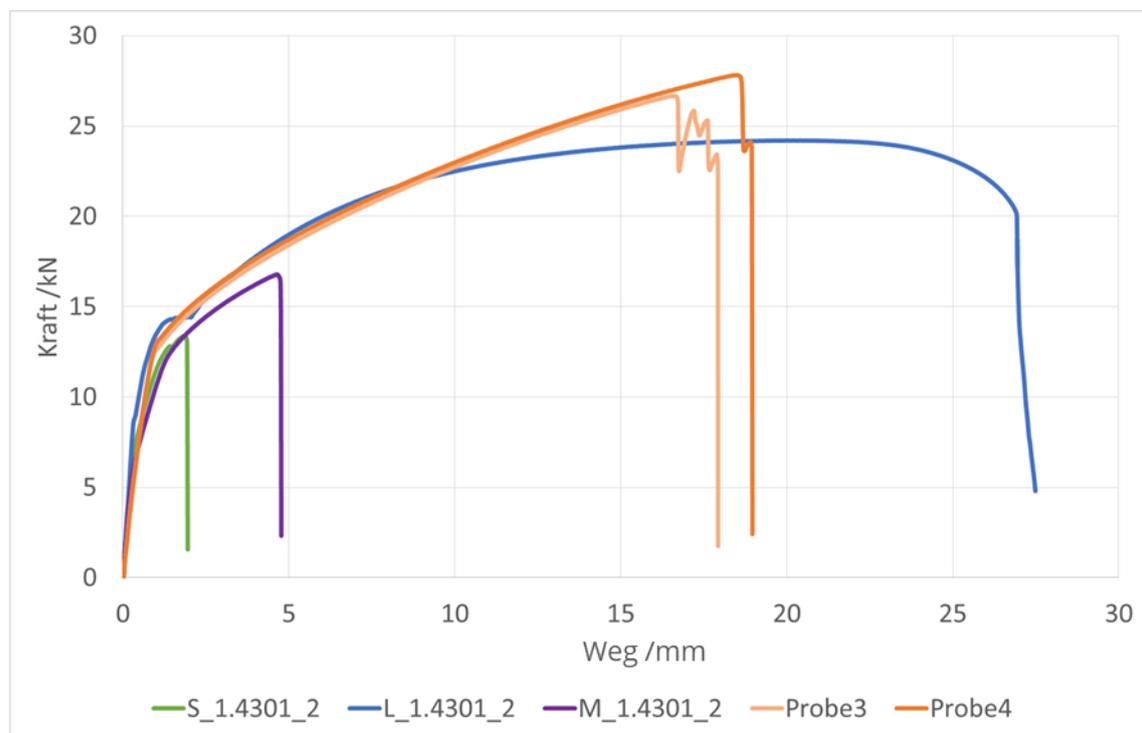


Abbildung 56: Lot: Ni620; Grundwerkstoff: 1.4301; Scherzugauswertung – Kraft-Weg-Diagramm

Die Proben L_1.4301_2 sowie Probe3 und Probe4 versagten im Grundwerkstoff.

Die Auswertung der Bruchflächen aller Proben zeigte einen Mischbruch mit unterschiedlich ausgeprägten Anteilen an Gleit- und transkristalinen Spaltbruch. Da die Lotmengen beim Hybrid-Reibbeschichten nicht dokumentiert sind, hat eine tiefere Bruchflächenanalyse keinen Mehrwert.

Erkenntnisgewinn der Validierung

Dem Verfahren Hybrid-Reibbeschichten ist mit diesem Abschnitt eindeutig der mögliche Einsatz als Verfahren zur Vorbelotung insbesondere mit Ni620-Lot nachgewiesen. Die Beschichtung führt bei Löttemperatur zum Lotfließen und zur Spaltfüllung. Die Scherzugversuche zeigen zudem, dass Paste und Hybrid-Reibbeschichtung ähnliche Festigkeitswerte in der Verbindung aufweisen.

5.4.3 Bewertung der Umweltverträglichkeit

Zur Bewertung der Umweltverträglichkeit sind zwei Bewertungskriterien herangezogen worden: Zum einen die Ausbringrate des Prozesses als Effizienzbewertung und zum anderen die Rauchemission als Gesundheitskriterium des Anwenders.

Während den Versuchen zum Aufstellen des Parameterfelds (s. Abbildung 37 & Abbildung 38) sind Bolzen und Substratblech vor und nach jedem Versuch gewogen worden, so dass eine Ausbringrate berechnet werden konnte. Die Ausbringung ist in Tabelle 18 dargestellt. Im Mittel beträgt die Ausbringung 31 % mit einer minimalen Ausbringung von 7 % und einer maximalen Ausbringung von 54 %. Die Ausbringung wird maßgeblich von der Prozesseinstellung und der Bolzenqualität beeinflusst. Während der Prozessführung fiel auf, dass der Bolzen in unregelmäßigen Zeitintervallen Material in Form von Spritzern verlor. Diese Spritzer werden auf eine Bolzenüberhitzung zurückgeführt, waren nicht anhaftend und konnten mit einem Handbesen oder durch Kippen des Blechs vom Substrat entfernt werden. Die Überhitzung kann wegen schlecht gewählten Prozessparametern eintreten, in den meisten Versuchen trat eine Überhitzung aber wegen der in Abschnitt „Phase 3 – Anlagenwechsel, Konstruktive Adaption, Versuche“ (s. Abbildung 30) erläuterten Bolzendefekte auf. Durch die Defekte tritt eine Querschnittverringering ein, durch welche weiterhin dieselbe Stromstärke geleitet wird. Dies führt zu einer erhöhten Erwärmung, somit zur Überhitzung und zu Spritzern. Eine gleichmäßigere Bolzenqualität führt demnach zu einer höheren Ausbringung.

Tabelle 18: Ausbringrate des Prozesses mit Ni620 auf 1.4301

Ausbringen		
Niedrigster Wert	Im Mittel	Höchster Wert
7%	31%	54%
0,47g Auftrag bei 6,05g Lot		0,88g Auftrag bei 1,62g Lot

Die Rauch- und Partikelemission wurde mit Hilfe einer Absaugung mit integriertem Filter direkt am Interface Bolzen – Substrat ebenfalls mit den Versuchen zum Aufstellen des Parameterfelds realisiert. Abbildung 57 zeigt den Aufbau. Nach jedem Versuch ist der Filter entnommen und gewogen worden. Die Messreihe ist in Tabelle 19 aufgeführt. Der Filter nimmt im Verlauf der Versuche insgesamt um 0,14 g Masse zu und zeigt keine Verfärbung.

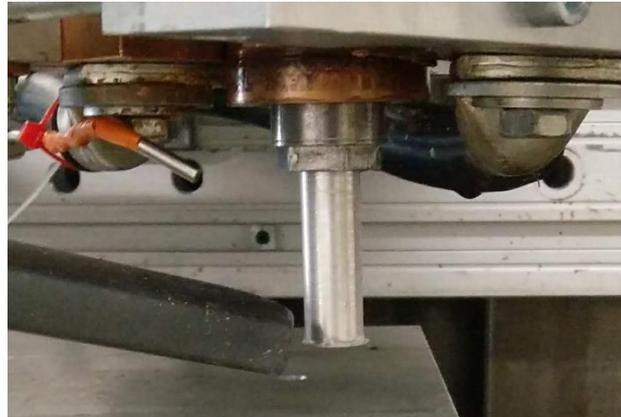


Abbildung 57: Aufbau Rauchemissionsmessungen

Die zusätzliche Masse wird auf abgesaugte Kupfer- und Nickelpartikel zurückgeführt. Die Kupferpartikel werden am Schleifkontakt abgerieben und einen Durchmesser größer 80 µm. Die Nickelpartikel sind Spritzer aus dem Prozess mit einer Größe größer Ø 100 µm. Da keine Verfärbung des Filters eingetreten ist, wird von keiner Gasbildung ausgegangen. Die Partikelgröße wird der E-Fraktion zugeordnet. Dies heißt, der Staub ist einatembar, jedoch nicht alveolengängig.

Tabelle 19: Filtergewicht der Rauchemissionsmessungen

Versuch	Δm_{Filter}
1	0,04 g
2	0,06 g
3	0 g
4	0 g
5	0,02 g
6	0,02 g

Zur Umweltverträglichkeit wird zusammengefasst, dass die Ausbringung für einen effizienten Prozess verbessert werden sollte. Der Prozess hat keine kritischen Dampf- oder Partikelerscheinungen in den durchgeführten Versuchen gezeigt. Dennoch sollte

durch den Anwender um das Einatmen der entstandenen Partikel eine Maske getragen werden oder der Arbeitsbereich abgeschirmt werden.

6 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen

Das diesem Forschungsvorhaben zugrunde gelegte Ziel, ein Belotungsverfahren, welches das Lot gut haftend, ohne umweltschädigende Chemikalien und lokal aufträgt, zu entwickeln, wurde erreicht. Festzuhalten ist, dass das Risiko der nicht erhaltenen Industrieanlage nicht vollständig kompensiert werden konnte und daher eventuelle Anwendern aktuell keine entsprechende Anlage kaufen können.

Angestrebt war der Einsatz einer Industrieanlage, welche zu Beginn des Forschungsvorhabens nicht zur Verfügung gestellt werden konnte. Zur erfolgreichen Erforschung ist daher eine eigene Anlage entwickelt worden. In diese Anlage wurde zur Hybridisierung des Reibbeschichtens eine zusätzliche Wirkenergie implantiert. Die eingesetzten Maschinen und Vorrichtungen sind im Abschnitt „Anlagentechnik“ erläutert.

Das Auftragen des Lotes durch Hybrid-Reibbeschichten konnte umgesetzt werden. Die Lotapplikation von höherschmelzenden Lotwerkstoffen größerer Festigkeit gegenüber Kupfer und die Erweiterung der beschichtbaren Grundwerkstoffe wurde mit der entwickelten Anlage umgesetzt. Durch die Bewertung der Haftfestigkeit ist zudem nachgewiesen worden, dass die Schichten transportfähig sind. Der Weg zu diesen Ergebnissen ist in Abschnitt „Phase 3 – Anlagenwechsel, Konstruktive Adaption, Versuche“ erläutert. In diesem Abschnitt wird zudem ein Parameterfeld mit möglichen Prozessparametern aufgestellt. Mit der Hybridisierung des Reibbeschichtens ist es gelungen die hohen Anpresskräfte von größer 2 kN auf unter 400 N deutlich zu reduzieren und somit dünnwandige Bleche zu beschichten.

In Abschnitt „Phase 4 – Modelbildung, Validierung und Umweltverträglichkeit“ ist ein Ansatz zur Darstellung der Wirkmechanismen mit Hilfe einer FEM-Simulation erarbeitet worden. Es wurde festgestellt, dass die Auswirkung der Reibenergie beim Hybrid-Reibbeschichten vernachlässigbar klein ist. Zudem wurde ein Nachweis der gleichen Löt eignung der Lot/GW-Kombination von hybrid-reibbeschichteten Proben im Vergleich zu konventionellen Lotapplikationsverfahren geführt. Die Löt eignung der aufgetragenen Schichten ist durch umfangreiche Benetzungsversuche dokumentiert und mit Scherzugversuchen bewertet vergleichend bewertet worden. Es ergaben sich bezogen auf das Löt ergebnis keine Unterschiede zu aktuell angewandten Lotapplikationsverfahren.

In demselben Abschnitt ist die Umweltverträglichkeit des Verfahrens nachgewiesen worden.

Somit ist trotz des hohen unerwarteten Risikos der nicht bereitstellbaren Anlagentechnik das Forschungsprojekt umfanglich und vollständig bearbeitet worden. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass das Verfahren Hybrid-Reibbeschichten als Option zum Vorbeloten eingesetzt werden kann. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens erfüllen die Zielsetzung.

7 Erläuterung zur Verwendung der Zuwendungen

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag. Alle durchgeführten Arbeiten erfolgten zielgerichtet. Das eingesetzte wissenschaftlich-technische Personal war für die Auswahl und Koordinierung sowie zur Bearbeitung der durchzuführenden Aufgaben notwendig und vom Zeitumfang her angemessen.

Die Verwendung der Zuwendungen für das wissenschaftlich-technische Personal an der Forschungseinrichtung, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage, erfolgte entsprechend dem Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplanes mit 24 PM in Vollzeit. Während der Projektlaufzeit wurden antragsgemäß keine Geräte (Einzelansatz B des FP) angeschafft und keine Leistungen Dritter (Einzelansatz C des FP) in Anspruch genommen. Für die experimentellen Untersuchungen wurde das durch die PA-Mitglieder zur Verfügung gestellte Versuchsmaterial und vorhandene Messsysteme verwendet.

Es wurden keine gewerblichen Schutzrechte erworben oder angemeldet. Dies ist auch zukünftig nicht geplant.

8 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen

8.1 Innovationspotential einer oder mehrerer Wirtschaftszweige

Der Einsatz von Vorbelotungen beim Löten ist auf vielfältige Art und Weise möglich. Eine Qualifizierung des Reibbeschichtens als weitere Methode ermöglicht den Anwendern eine einfachere Montage der beschichteten Teile bei Wegfall von Fixierungen. Das Lot kann ohne Schutzatmosphäre direkt an der benötigten Stelle positioniert werden. Es erfolgt nur ein geringer Wärmeeintrag in den Grundwerkstoff. Im Vergleich zu anderen Verfahren sind eine zeitlich nahezu unbegrenzte Lagerung und der Transport der beschichteten Bauteile möglich. Die Erweiterung des Verfahrens mit einer zusätzlichen Wärmequelle ermöglicht es, bisher nicht genutzte Lotwerkstoffe einzusetzen. Kenntnisse über die Prozessabläufe und werkstofftechnische Zusammenhänge können umfangreiche Untersuchungen für neue Lotwerkstoffe eingrenzen.

8.2 Potenzieller Nutzerkreis vor dem Hintergrund der adressierten Zielgruppe

Eine Oberflächenbeschichtung unabhängig vom zeitlichen Horizont vor dem Einsatz der Bauteile aufzubringen ermöglicht besonders KMU ihre Flexibilität in der Herstellung zu steigern. Speziell bei einer Serienproduktion ist die Lagerfähigkeit von Bauteilen notwendig. Da die Beschichtung sich während der Lagerzeit nicht verändert, kann dieser Anspruch mittels Hybrid-Reibbeschichten erfüllt werden.

8.3 Beitrag zur Entstehung neuer bzw. deutlicher Erweiterung bestehender Geschäftsfelder

Die Fixierung einer Lötbaugruppe mit beschichteten Bauteilen kann mit einer leichten Presspassung erfolgen. Dies ermöglicht sowohl eine einfachere Vormontage als auch Transport. KMU können diesen Aspekt nutzen, da der Zusammenbau von Baugruppen einfacher erfolgt und gegebenenfalls auch neue Unterbaugruppen ermöglicht, welche an KMU als Zulieferer ausgegeben werden können. Die Bauteile können außerdem zwischen unterschiedlichen Fertigungsstandorten einfacher ausgetauscht werden. Für die Fügetechnik im Bereich Löten ermöglicht die Presspassung eine genaue Einstellung

des Montagespalts über die Schichtdicke. Im Vergleich zu konventionellen Lotapplikationen, wie Paste, Draht oder Folie, gewährleistet die sichere und reproduzierbare Einstellung des Montagespaltes den notwendigen kapillaren Fülldruck und eine vollständige Füllung des Spaltes. Das Hybrid-Reibbeschichten verringert somit zeitintensive Positionierungen.

Neben den konstruktiven Vorteilen können KMU auch ihre Werkstoffmatrix erweitern. Die Beschichtungsanlage ist einfach aufgebaut. Der Bolzen kann aus einer Vielzahl von metallischen Werkstoffen gefertigt werden. Sowohl Beschichtung des Werkstücks als auch Austausch des Bolzens erfolgen schnell. Die geringen Temperaturen während des Beschichtungsvorgangs führen nicht zur Verdampfung des Substrats. Somit wird weder die chemische Zusammensetzung beeinflusst noch ist eine Absauganlage erforderlich.

Durch das Hybrid-Reibbeschichten wird eine stoffschlüssige Verbindung zwischen dem Grundwerkstoff und der Schicht erzeugt. Diese Oberfläche muss für einen anschließenden Lötprozess nicht aktiviert werden. Lediglich die freie Oberfläche der Beschichtung wird aktiviert. In Abhängigkeit von der Beschichtung ermöglicht dies eine Einsparung von Vorbehandlungsmaßnahmen und den Einsatz von Flussmittel.

9 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Tabelle 20: Durchgeführte Maßnahmen zum Transfer der Ergebnisse

	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Maßnahme A Projektbegleitender Ausschuss	Diskussion der Forschungsergebnisse im PA	A1: Vorstellung des Projektes und Diskussion der geplanten Arbeiten	25.04.2017, 09.10.2017, 08.02.2018, 18.09.2018, 29.10.2018, 27.02.2019,
		A2: Abschlusspräsentation der erzielten Ergebnisse	24.09.2019
Maßnahme B Transfer Projektergeb. über FV	Information über das laufende Forschungsprojekt im FA7 Lötten (DVS), AK- WNV (FVA)	B1: Vorstellung der erzielten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens	Frühjahrssitzung 2017,2018,2019 Herbstsitzung 2017,2018,2019
Maßnahme C Fachvorträge auf Konferenzen	Information interessierter Firmen	C1:LÖT Aachen	Sommer 2019
		C2:Institusseminare	Herbst 2019
Maßnahme D Veröffentlichung	Interesse an der Technologie wecken und über neue Möglichkeiten aufklären	D1: Fachzeitschriften	DVS Berichte Band 353 [32]
Maßnahme E Aus- und Weiterbildung	Ausbildung und Qualifizierung von Studierenden	E1: Integr. in Vorlesungen "Lötten"	sei SS 2019
		E2: Integr. Ausbildung Schweißfachingenieur (mit SLV Halle)	seit Dez. 2017
		E3: Diplom- und Belegarbeiten	seit Dez. 2017
Maßnahme F Zusatzinformationen / Beratung	Information interessierter Firmen	F1: Weitergabe von prozess- und werkstofftechnischen Empfehlungen	seit Dez. 2017
		F2: Kurzberichterstattungen gegenüber interessierten Firmen	27.10.2017, 05.12.2017, 11.01.2018, 05.03.2018, 15.05.2018, 27.07.2018,

			23.04.2019, 16.07.2019
Maßnahme G Berichterstattung	Information interessierter Firmen	G1: Zwischenbericht	März 2017,2018,2019
		G2: Abschlussbericht	Februar 2020

Tabelle 21: Geplante Maßnahmen zum Transfer der Ergebnisse

	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Maßnahme D Veröffentlichung	Interesse an der Technologie wecken und über neue Möglichkeiten aufklären	D2: Internetseite FST	März 2020
Maßnahme H Weiterbildung von Mitarbeitern interessierter Firmen	Wissenstransfer auf KMU ohne eigene Forschungsabteilung	H1: Schulungen im Rahmen des Forschungs- und Anwendungszentrums für Füge- und Beschichtungsverfahren (FORUM)	laufend
Maßnahme I Veröffentlichungen	Ergebnistransfer	I1: Abschlussbericht auf Internetseite DVS und FST I2: 39. Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik I2: Artikel DVS-Fachzeitschrift	Februar 2020 Februar 2020 Mai 2020
Maßnahme J Funktionsmuster	Ergebnistransfer	J1: Funktionsmuster zur Darstellung d. Leistungsfähigkeit der Technologie; verbleiben an Forschungsstelle, keine Veräußerung an Dritte	ab Dez. 2017

10 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Im fortgeschriebenen Plan zum Ergebnistransfer werden verschiedene bisherige und geplante Maßnahmen dargestellt.

Eine weite Verbreitung der Forschungsergebnisse an KMU ist über die schon getätigten bzw. noch beabsichtigten Konferenzvorträge, Fachbeiträge in Zeitschriften und Tagungsbände sowie die Einbindung in die akademische Ausbildung an den

Universitäten gegeben. Die Firmen des Projektbegleitenden Ausschusses (sowohl KMU als auch Großunternehmen) und auch weitere Firmen haben durch die Veröffentlichungen Zugriff auf die Forschungsergebnisse. Auch die Online-Veröffentlichungen auf den Internetseiten der Forschungseinrichtungen lassen erwarten, dass sich weitere KMU bei den Forschungseinrichtungen melden, um Forschungsergebnisse abzurufen und in die Praxis zu überführen. Eine Übernahme der Ergebnisse in Arbeitsblätter/Technische Regelwerke/Normen durch Zuarbeit bei der Überarbeitung von DVS-Merkblättern ist auf Anfrage vorstellbar und wird gerne unterstützt. Der bereits durchgeführten Transfermaßnahmen in Tabelle 20 zeigen insbesondere bei der Maßnahme F, dass Interesse an Verfahren besteht und zukünftige Weiterentwicklungen das Potential besitzt, diese im industriellen Umfeld zu etablieren.

Die vorgeschlagenen und aktualisierten Transfermaßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und insbesondere zu kleinen und mittleren Unternehmen sind in sich schlüssig, so dass von einer erfolgreichen Realisierung der noch geplanten Maßnahmen ausgegangen wird.

11 Anhang – Phase 2

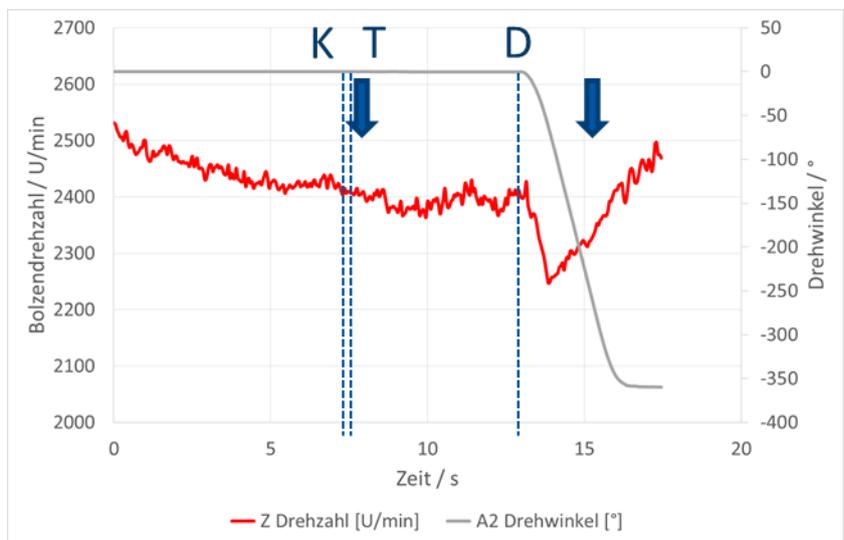


Abbildung 58: Bolzendrehzahl – Versuch h (0,4 kN, 2400 U/min, 24 U/min, 1,5 kA)

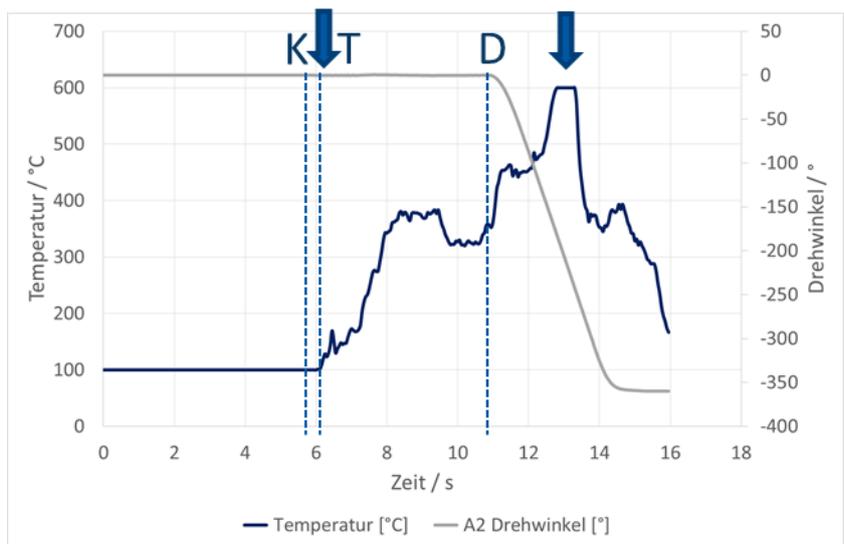


Abbildung 59: Temperatur – Versuch j (0,4 kN, 2400 U/min, 20 U/min, 1,5 kA)

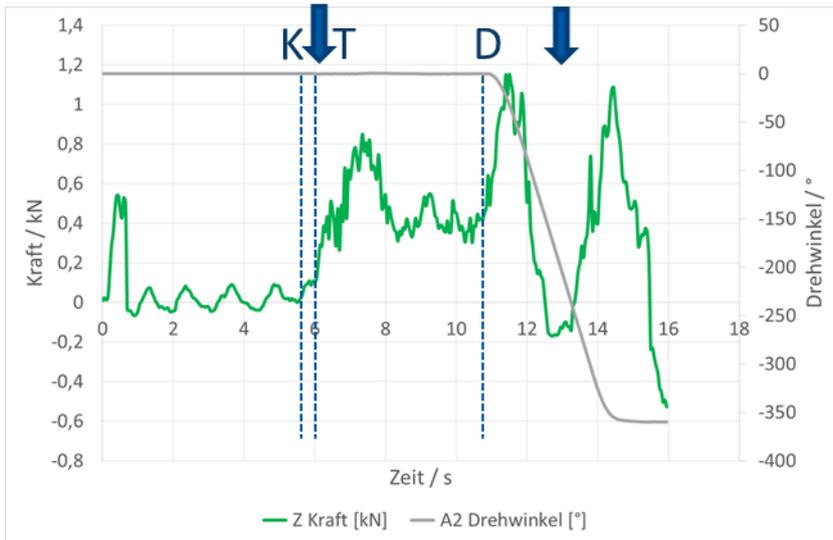


Abbildung 60: Axiale Kraft – Versuch j (0,4 kN, 2400 U/min, 20 U/min, 1,5 kA)

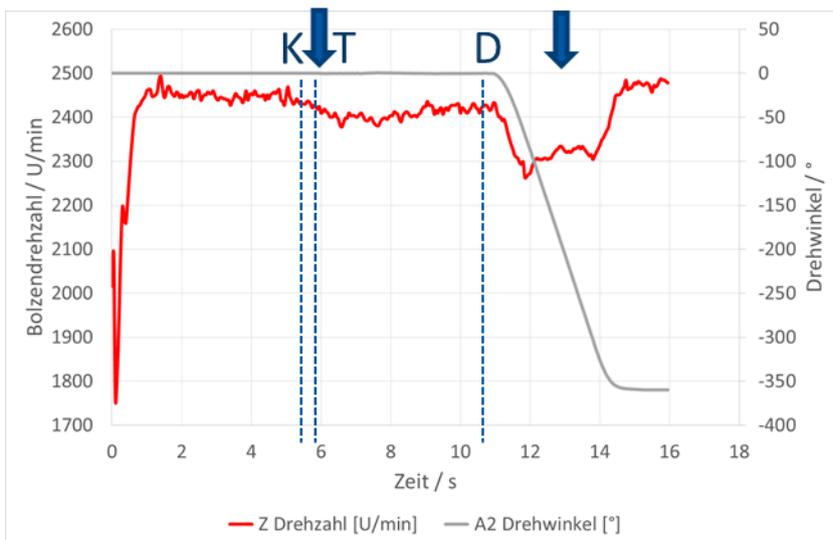


Abbildung 61: Bolzendrehzahl – Versuch j (0,4 kN, 2400 U/min, 20 U/min, 1,5 kA)

12 Anhang – Phase 3

Datum	Maschine	Bolzen	Substrat	Kühlung	Einzel-/ Mehrums	Ergebnis	Drehzahl/ U/min	Vorschub/ mm/min	Winkel/ °	Kraft/ N	Stromstärke/ kA	Stromzeit/ ms
07.05.2018	Merkel	Kupfer D8	S235	0 #e	#s		710	160	0	133	1,5	3000
07.05.2018	Merkel	Kupfer D8	S235	0 #e	#s		450	160	0	133	1	3000
07.05.2018	Merkel	Kupfer D8	S235	0 #e	#s		450	160	0	133	1,5	3000
07.05.2018	Merkel	Kupfer D8	S235	0 #e	#s		450	160	0	133	1,25	3000
07.05.2018	Merkel	Kupfer D8	S235	0 #e	#s		450	160	0	160	1	3000
07.05.2018	Merkel	Kupfer D8	S235	0 #e	#s		450	160	0	213	1	3000
07.05.2018	Merkel	Kupfer D8	S235	0 #e	#s		450	160	0	213	1	3000
07.05.2018	Merkel	Kupfer D8	S235	0 #e	#s		450	160	0	213	1,2	4500
08.05.2018	Merkel	Kupfer D10	S235	0 #e	#s		450	160	0	213	1,5	4500
08.05.2018	Merkel	Kupfer D10	S235	0 #e	#s		450	160	0	213	2	4500
08.05.2018	Merkel	Kupfer D10	S235	0 #e	#s		450	160	0	213	2	4500
08.05.2018	Merkel	Kupfer D10	S235	0 #e	#s		450	160	0	187	5	80-5-80
08.05.2018	Merkel	Kupfer D10	S235	0 #e	#s		450	160	0	187	7	80-5-80
08.05.2018	Merkel	Kupfer D10	S235	0 #e	#s		450	160	0	187	7	65-5-65
08.05.2018	Merkel	Kupfer D10	S235	0 #e	#s		450	160	0	187	7	50-5-50
08.05.2018	Merkel	Kupfer D10	S235	0 #e	#s		450	160	0	187	7	50-10-50
08.05.2018	Merkel	Kupfer D10	S235	0 #e	#s		710	160	0	187	7	50-10-50
08.05.2018	Merkel	Kupfer D10	S235	0 #e	#s		710	250	0	187	7	50-10-50
09.05.2018	Merkel	Kupfer D10	S235	0 #e	#s		710	250	0	187	7	50-10-50
09.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		450	200	0	250	7	50-10-50
09.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		450	80	0	250	7	50-10-50
09.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		450	80	0	250	7	50-10-50
09.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		450	80	0	250	7	50-10-50
09.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		450	80	0	250	3,5	50-10-50
09.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		450	80	0	400	7	50-10-50
09.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		450	80	0	250	7	50-10-50
09.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		450	80	0	250	7	50-10-50
09.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		450	80	0	250	7	50-10-50
09.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		450	125	0	300	7	50-10-50
09.05.2018	Merkel	Nickel D12	S235	0 #e	#s		450	125	0	300	7	50-10-50
09.05.2018	Merkel	Nickel D12	S235	0 #e	#g		450	200	0	300	7	50-10-50

Datum	Maschine	Bolzen	Substrat	Kühlung	Einzel-/ Mehrals	Ergebnis	Drehzahl/ U/min	Vorschub/ mm/min	Winkel/ °	Kraft/ N	Stromstärke/ kA	Stromzeit/ ms
11.05.2018	Merkel	Nickel D12	1.4301	0 #e	#s	450	100	0	300	3,5	40-5-15-5	
11.05.2018	Merkel	Nickel D12	1.4301	0 #e	#s	450	100	0	300	1,5	40-5-15-5	
11.05.2018	Merkel	Nickel D12	1.4301	0 #e	#s	450	100	0	300	2,25	40-5-15-5	
11.05.2018	Merkel	Nickel D12	1.4301	0 #e	#s	450	100	0	300	2,25	40-5-15-5	
11.05.2018	Merkel	Nickel D12	1.4301	0 #e	#s	450	100	0	300	2,25	40-5-15-5	
11.05.2018	Merkel	Nickel D12	1.4301	0 #e	#s	450	100	0	300	1,75	40-5-15-5	
11.05.2018	Merkel	Nickel D12	1.4301	0 #e	#s	450	100	0	300	1,75	40-5-15-5	
11.05.2018	Merkel	Nickel D12	S235	0 #e	#s	450	100	0	300	2,25	40-5-15-5	
11.05.2018	Merkel	Nickel D12	S235	0 #e	#s	450	100	0	300	3,5	40-5-15-5	
11.05.2018	Merkel	Nickel D12	S235	0 #e	#s	450	100	0	300	5	40-5-15-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	80	16	300	1,5	200-5-40-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	80	16	500	1,5	200-5-40-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	80	16	500	3,5	200-5-40-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	80	16	750	3,5	200-5-40-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	80	16	1000	3,5	200-5-40-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	80	16	1250	3,5	200-5-40-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s	710	80	16	1250	4	200-5-40-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s	450	80	16	1250	3,5	200-5-40-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	450	80	16	1250	3,5	200-5-40-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	450	80	16	1250	4,5	200-5-40-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	80	16	1250	3,9	200-5-40-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	450	80	16	1250	3,9	200-5-40-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	450	80	16	1250	3,9	100-5-40-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	450	80	16	1250	3,5	150-5-40-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	450	80	16	1350	3,5	100-5-40-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	450	80	16	1400	3,9	100-5-40-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	450	80	16	1400	3,9	100-5-40-5	
14.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	450	80	16	1400	3,9	100-5-40-5	
15.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	80	16	665	5	200-5-40-5	
15.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	80	16	665	3,5	200-5-40-5	
15.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	80	16	532	5	200-5-40-5	

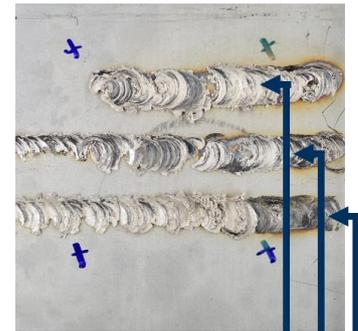
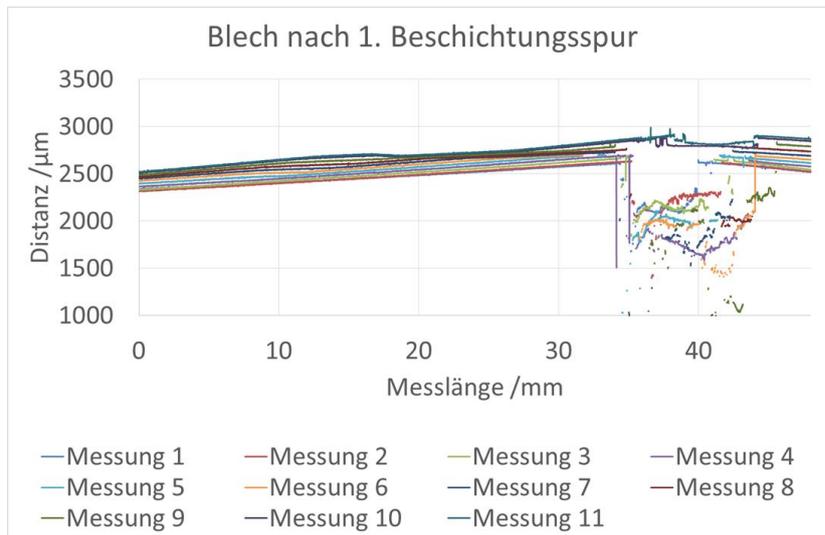
Datum	Maschine	Bolzen	Substrat	Kühlung	Einzel-/ Mehrals	Ergebnis	Drehzahl/ U/min	Vorschub/ mm/min	Winkel/ °	Kraft/ N	Stromstärke/ kA	Stromzeit/ ms
15.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s		710	80	16	532		5 200-5-40-5
15.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s		710	80	0	532		3,5 200-5-40-5
15.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s		710	80	0	532		3,5 200-5-40-5
15.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s		710	80	0	266		3,5 200-5-40-5
15.05.2018	Merkel	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s		710	200	0	266		3,5 200-5-40-5
18.05.2018	Merkel	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		450	200	0	500		3,5 200-5-40-5
18.05.2018	Merkel	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#g		450	200	0	1000		3,5 200-5-40-5
18.05.2018	Merkel	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#g		710	160	0	1000		2 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	100	2	815		3 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	80	2	400		3 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	80	2	300		2,5 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	80	2	300		3 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	80	2	300		3 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	160	2	300		3 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	160	2	300		2,5 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	100	2	300		0,75 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	100	2	150		0,5 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	100	2	150		0,5 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	100	2	150		0,6 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	100	2	150		0,65 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	100	2	150		0,7 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	100	2	150		0,75 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	100	2	150		0,8 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	100	2	150		0,85 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	100	2	150		0,9 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	100	2	150		0,9 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	100	2	150		0,95 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	100	2	150		1 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	100	2	150		1 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	100	2	815		1 200-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		28	100	2	400		1 1500

Datum	Maschine	Boizen	Substrat	Kühlung	Einzel-/ Mehrals	Ergebnis	Drehzahl/ U/min	Vorschub/ mm/min	Winkel/ °	Kraft/ N	Stromstärke/ kA	Stromzeit/ ms
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		28	250	2	400	1	1500
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		28	250	2	400	2	1500
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		28	250	2	400	1,5	80-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		28	250	2	400	2	80-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		45	250	2	400	2	80-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	250	2	400	1,5	80-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	315	0	400	1,5	80-5-40-5
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#s		1400	315	0	400	1,5	1500
06.06.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	S235	0 #e	#s		1400	250	0	400	1,5	1500
19.07.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	S235	0 #e	#s		1400	200	0	400	2	50-5-40-5
19.07.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	S235	0 #e	#s		1400	200	0	400	1,5	50-5-40-5
19.07.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	S235	0 #e	#s		450	200	0	400	1,5	50-5-40-5
19.07.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	S235	0 #e	#s		450	200	0	400	2	50-5-40-5
19.07.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	S235	0 #e	#s		450	200	0	400	2,5	50-5-40-5
20.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		1400	200	0	400	3	50-5-40-5
20.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		1400	200	0	400	3	50-5-40-5
20.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		450	200	0	400	3	50-5-40-5
20.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#g		112	200	15	400	3	50-5-40-5
20.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		1400	200	15	400	3	50-5-40-5
20.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		710	200	15	400	3	50-5-40-5
23.07.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	S235	0 #e	#g		710	200	15	400	1	1500
23.07.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	S235	0 #e	#g		710	200	15	400	1	1500
23.07.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	S235	0 #e	#g		900	200	15	400	1	1500
23.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#g		710	200	15	400	3	50-5-40-5
23.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		710	200	15	400	3	50-5-40-5
23.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		710	200	15	400	3	50-5-40-5
23.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		710	200	15	400	1,5	1500
23.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		710	200	15	400	2	1500
23.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#g		710	200	15	400	2	1500
23.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		710	200	15	400	2,5	1500
23.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s		710	200	15	400	1,5	1500

Datum	Maschine	Bolzen	Substrat	Kühlung	Einzel-/ Mehrals	Ergebnis	Drehzahl/ U/min	Vorschub/ mm/min	Winkel/ °	Kraft/ N	Stromstärke/ kA	Stromzeit/ ms
23.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	200	15	400	1,5	1500	
23.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	200	15	400	1	1500	
23.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1400	200	15	400	1	1500	
23.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1400	200	15	400	2,5	80-5-40-5	
23.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1400	200	15	400	2	80-5-40-5	
23.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1400	200	15	400	1,5	80-5-40-5	
23.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1400	200	15	400	1	80-5-40-5	
25.07.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	S235	0 #e	#g	710	200	15	400	1	1500	
25.07.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	S235	0 #e	#g	710	200	15	400	1	1500	
25.07.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#g	710	200	15	400	1	1500	
25.07.2018	Zeuner	Nickel D12 d8	1.4301	0 #e	#g	710	200	15	400	1	1500	
30.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1400	200	15	400	1,25	80-5-40-5	
30.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1400	200	15	400	1,25	80-5-40-5	
30.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1400	200	15	400	1,25	80-5-40-5	
30.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1400	200	15	400	1,5	80-5-40-5	
30.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1400	200	15	400	1,5	80-5-40-5	
30.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1400	200	15	400	1,25	1500	
30.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	200	15	400	1,25	1500	
30.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	200	15	400	1,25	1500	
30.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	200	15	400	0,8	1500	
30.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	200	15	400	1	1500	
30.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	200	15	400	3	50-5-40-5	
30.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	200	15	400	2	50-5-40-5	
30.07.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	200	15	400	1,5	50-5-40-5	
26.09.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#g	710	200	15	400	1,25	1500	
26.09.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s	710	200	15	400	1	1500	
26.09.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s	710	200	15	400	1,5	1500	
26.09.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s	710	200	15	400	1,5	80-5-40-5	
26.09.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s	710	200	15	400	1,25	80-5-40-5	
27.09.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s	710	200	15	400	1,5	80-5-40-5	
27.09.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#s	710	200	15	400	1,5	1500	

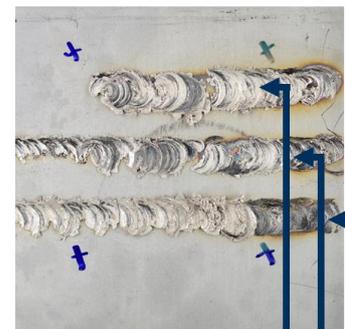
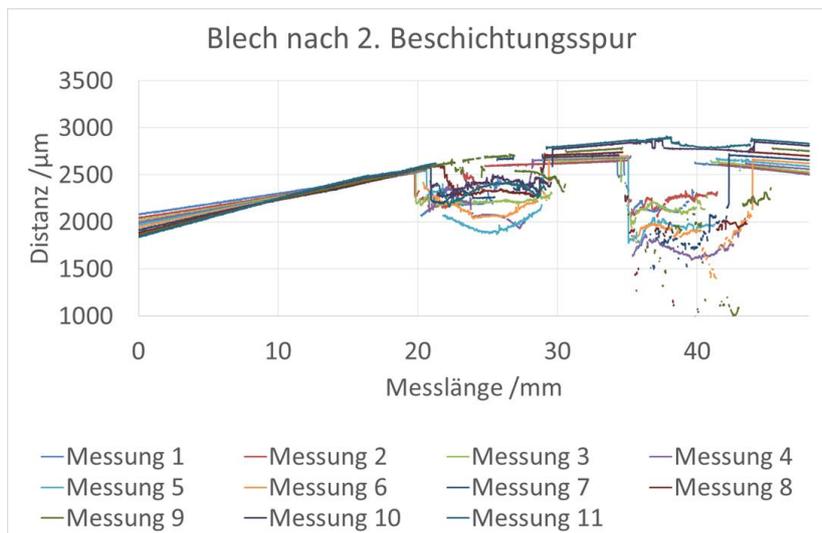
Datum	Maschine	Bolzen	Substrat	Kühlung	Einzel-/ Mehrums	Ergebnis	Drehzahl/ U/min	Vorschub/ mm/min	Winkel/ °	Kraft/ N	Stromstärke/ kA	Stromzeit/ ms
17.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#g	710	250	15	400	2,25	80-5-40-5	
17.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	0 #e	#g	900	250	15	400	2,25	80-5-40-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	200	15	400	2,7	80-5-10-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	200	15	400	2,5	80-5-10-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	710	200	15	400	2,5	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#g	900	200	15	400	2,5	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1120	200	15	400	2,5	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1120	200	15	400	2	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1120	200	15	400	2	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1120	250	15	400	2	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1120	250	15	400	2	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1120	160	15	400	2	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1120	125	15	400	2	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1120	125	15	400	2	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	0 #e	#s	1120	125	15	400	0,5	1500	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	1 #e	#s	1120	125	15	400	1	1500	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	1 #e	#s	1120	125	15	400	2,5	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	1 #e	#s	900	125	15	400	2,5	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	1 #m	#g	900	125	15	400	2,5	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	1 #m	#g	900	125	15	400	2,5	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	1 #m	#g	900	125	15	400	2,5	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	1 #e	#s	900	125	15	400	2,5	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	1 #m	#g	1120	125	15	400	2,5	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	1 #m	#g	1120	125	15	400	2,5	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	1.4301	1 #m	#g	1120	125	15	400	2,5	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	1 #e	#g	1120	250	15	400	2,25	80-5-40-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	1 #e	#g	1400	250	15	400	2	80-5-40-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	1 #e	#g	1120	250	15	400	2	80-5-40-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	1 #e	#g	710	250	15	400	2	80-5-40-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	1 #e	#g	710	200	15	400	2	80-5-40-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	1 #e	#g	710	200	15	400	2	80-5-40-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	1 #e	#g	710	200	15	400	3	80-5-20-5	

Datum	Maschine	Bolzen	Substrat	Kühlung	Einzel-/ Mehrals	Ergebnis	Drehzahl/ U/min	Vorschub/ mm/min	Winkel/ °	Kraft/ N	Stromstärke/ kA	Stromzeit/ ms
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	1 #e	#g	710	200	15	400	2,5	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	1 #e	#g	710	200	15	400	2,75	80-5-20-5	
18.10.2018	Zeuner	Kupfer D12 d8	S235	1 #e	#g	710	200	15	400	2,65	80-5-20-5	
21.02.2019	Zeuner	Ni620 D12 D10	1.4301	1 #e	#g	450	250	2	400	1	1500	
21.02.2019	Zeuner	Ni620 D12 D10	1.4301	1 #e	#g	710	160	2	400	1	1500	
21.02.2019	Zeuner	Ni620 D12 D10	1.4301	1 #e	#g	710	160	2	400	1	1500	
21.02.2019	Zeuner	Ni620 D12 D10	1.4301	1 #e	#g	710	160	2	400	1	1500	
21.02.2019	Zeuner	Ni620 D12 D10	1.4301	1 #e	#g	1400	160	2	400	1	1500	
21.02.2019	Zeuner	Ni620 D12 D10	1.4301	1 #e	#g	1400	160	2	400	1	1500	
21.02.2019	Zeuner	Ni620 D12 D10	1.4301	1 #e	#g	1400	160	2	400	1,5	1500	
21.02.2019	Zeuner	Ni620 D12 D10	1.4301	1 #e	#g	1400	160	2	400	1,75	1500	
22.02.2019	Zeuner	Ni620 D12 D10	1.4301	1 #e	#g	1400	160	0	400	1,75	1500	



Beschichtungsspur 1
 Beschichtungsspur 2
 Beschichtungsspur 3

Abbildung 62: Konfokalemessung – links: Messung nach einer Beschichtungsspur; rechts: Nummerierung der Beschichtungsspuren



Beschichtungsspur 1
 Beschichtungsspur 2
 Beschichtungsspur 3

Abbildung 63: Konfokalemessung – links: Messung nach zwei Beschichtungsspuren; rechts: Nummerierung der Beschichtungsspuren

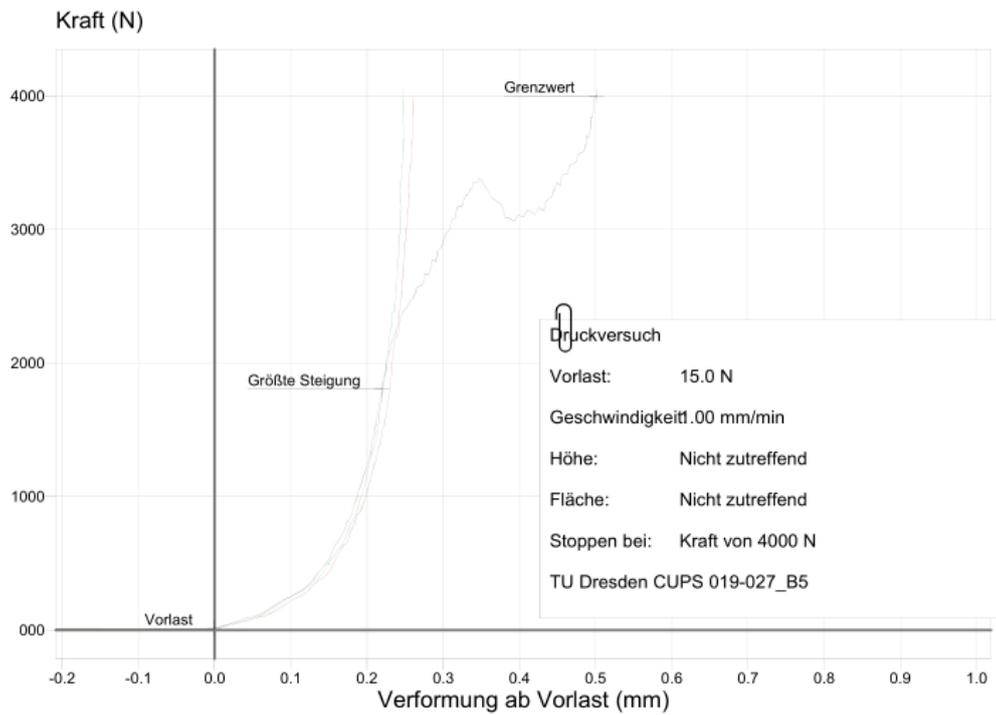


Abbildung 64: Kraft-Weg-Diagramm der ausgewerteten Proben CW008A auf S235

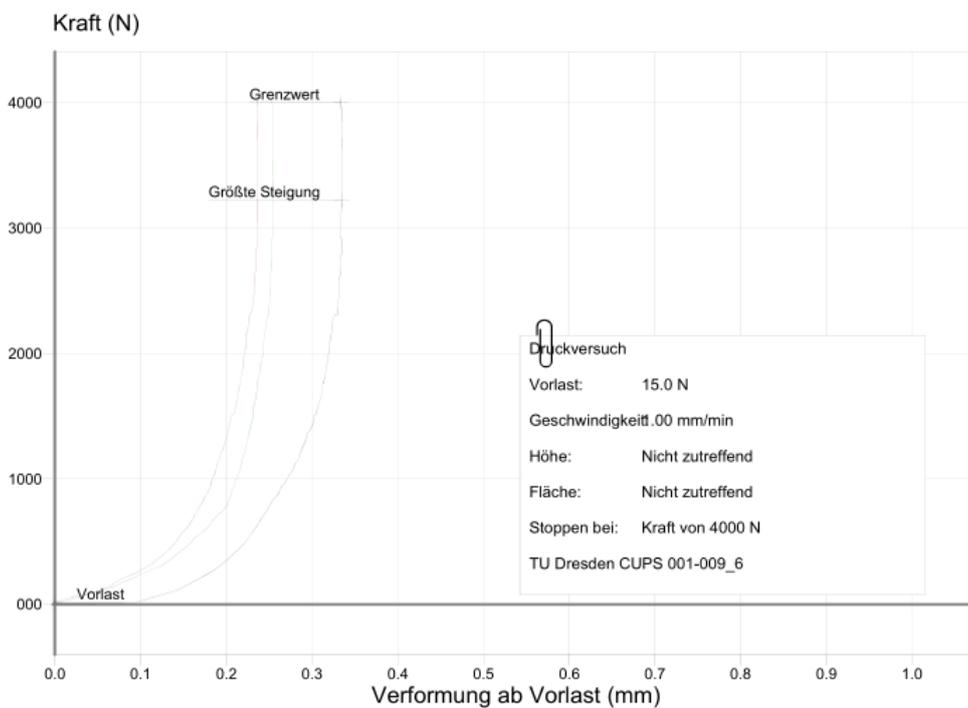


Abbildung 65: Kraft-Weg-Diagramm der ausgewerteten Proben Ni620 auf S235

13 Literaturangaben

- [1] DIN 8580; 2003-09. *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*
- [2] DIN 8593-7; 2003-09. *Fertigungsverfahren Fügen - Teil 7: Fügen durch Löten - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*
- [3] Müller, W. u. Müller, J.-U.: *Löttechnik. Leitfaden für die Praxis. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd. 127.* Düsseldorf: Dt. Verl. für Schweißtechnik 1995
- [4] Wittke, K. u. Scheel, W.: *Handbuch Lötverbindungen.* Hanser-eLibrary. Bad Saulgau, Germany, München: Eugen G. Leuze Verlag; Carl Hanser Verlag 2017
- [5] Fritz, A. H. u. Schulze, G. (Hrsg.): *Fertigungstechnik. Springer-Lehrbuch, Bd. 0.* Berlin: Springer 2010
- [6] Bobzin, K.: *Oberflächentechnik für den Maschinenbau.* Weinheim: Wiley-VCH 2013
- [7] DIN 1910-3; 1977-09. *Schweißen - Schweißen von Kunststoffen, Verfahren*
- [8] Meyer, K., G. Polzer u. F. Meissner: *Grundlagen zu Reibung und Verschleiß.* Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig 1984
- [9] I. W. Kragelski: *Reibung und Verschleiß* Carl Hanser Verlag, München, 1971, 423 Seiten mit 253 Bildern und 60 Tafeln, Format 17 cm × 24,5 cm, Leinen, DM 80-. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 3 (1972) 6, S. 335
- [10] Grünauer, H.: *Reibschweißen von Metallen. Kontakt & Studium, Bd. 198.* Ehningen bei Böblingen: expert-Verl. 1987
- [11] Schmidt, J.: *Beitrag zur Prozeßsteuerung beim Reibschweißen,* RWTH Aachen Dissertation. Aachen 1982
- [12] Nguyen, V. D.: *Beschichtungsverfahren für die Press-Presslöt-Verbindungen - Reibauftraglöten.* Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2014. *Dresdner fügetechnische Berichte, Bd. 27.* Dresden: TUDpress Verl. der Wiss 2014
- [13] Gandra, J., Miranda, R. M. u. Vilaça, P.: *Performance analysis of friction surfacing.* *Journal of Materials Processing Technology* 212 (2012) 8, S. 1676–1686
- [14] Gandra, J., Krohn, H., Miranda, R. M., Vilaça, P., Quintino, L. u. Dos Santos, J. F.: *Friction surfacing—A review.* *Journal of Materials Processing Technology* 214 (2014) 5, S. 1062–1093
- [15] Nicholas, E. D.: *Friction Processing Technologies.* *Welding in the World* 47 (2003) 11-12, S. 2–9
- [16] Bedford, G. M., Vitanov, V. I. u. Voutchkov, I. I.: *On the thermo-mechanical events during friction surfacing of high speed steels.* *Surface and Coatings Technology* 141 (2001) 1, S. 34–39

- [17] Shinoda, T., Okamoto, S., Takemoto, S., Kato, Y. u. Shimizu, T.: Deposition of hard surfacing layer by friction surfacing. *Welding International* 10 (2009) 4, S. 288–294
- [18] Li, J. Q. u. Shinoda, T.: Underwater friction surfacing. *Surface Engineering* 16 (2013) 1, S. 31–35
- [19] Santos, T. G., Miranda, R. M. u. Vilaça, P.: Friction Stir Welding assisted by electrical Joule effect. *Journal of Materials Processing Technology* 214 (2014) 10, S. 2127–2133
- [20] Highspeed FSW-Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit beim Rührreibschweißen mittels konduktiver Erwärmung. Zwischenbericht, Naumov, A., Schleser, M. u. Reisgen, U., 2013
- [21] Rose, S., Mahrle, A., Schnick, M., Pinder, T., Beyer, E. u. Füssel, U.: Plasma welding with a superimposed coaxial fiber laser beam. *Welding in the World* 57 (2013) 6, S. 857–865
- [22] Mahrle, A., Schnick, M., Rose, S., Demuth, C., Beyer, E. u. Füssel, U.: Process characteristics of fibre-laser-assisted plasma arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics* 44 (2011) 34, S. 345502
- [23] Batchelor, A. W., Jana, S., Koh, C. P. u. Tan, C. S.: The effect of metal type and multi-layering on friction surfacing. *Journal of Materials Processing Technology* 57 (1996) 1-2, S. 172–181
- [24] Chandrasekaran, M., Batchelor, A. W. u. Jana, S.: Study of the interfacial phenomena during friction surfacing of mild steel with tool steel and inconel. *Journal of Materials Science* 33 (1998) 10, S. 2709–2717
- [25] Chandrasekaran, M., Batchelor, A. W. u. Jana, S.: Study of the interfacial phenomena during friction surfacing of aluminium with steels. *Journal of Materials Science* 32 (1997) 22, S. 6055–6062
- [26] Köberlin, D.: EKK Anlagentechnik - Kohlebürsten bei 4000 Ampere. Telefonat. 2019
- [27] MultiChoice Basic Serie. Goldammer Datenblatt, Goldammer GmbH
- [28] Rahlves, M., Rahlves, M. u. Seewig, J.: *Optisches Messen technischer Oberflächen. Messprinzipien und Begriffe.* Beuth Pocket. s.l.: Beuth Verlag GmbH 2009
- [29] Nguyen, V. D.: *Fachgespräch, diversere Zeitpunkte.* Chemnitz 2018
- [30] Gerthsen, C. u. Meschede, D.: *Physik. Mit ...10 Farbtafeln, 93 Tabellen, 105 durchgerechneten Beispielen und 1074 Aufgaben mit vollständigen Lösungen auf CD-ROM ; [die ganze Physik zum 21. Jahrhundert].* Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer 2004
- [31] Muhs, D., Becker, M., Jannasch, D., Voßiek, J. u. Wittel, H.: *Roloff/Matek Maschinenelemente Formelsammlung. Interaktive Formelsammlung auf CD-*

ROM. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH
Wiesbaden 2006

[32] Brazing, high temperature brazing and diffusion bonding - LÖT 2019. DVS-
Berichte Band 353. DVS Media 2019

[33] Khalid Rafi, H., Balasubramaniam, K., Phanikumar, G. u. Prasad Rao, K.: Thermal
Profiling Using Infrared Thermography in Friction Surfacing. Metallurgical and
Materials Transactions A 42 (2011) 11, S. 3425–3429

